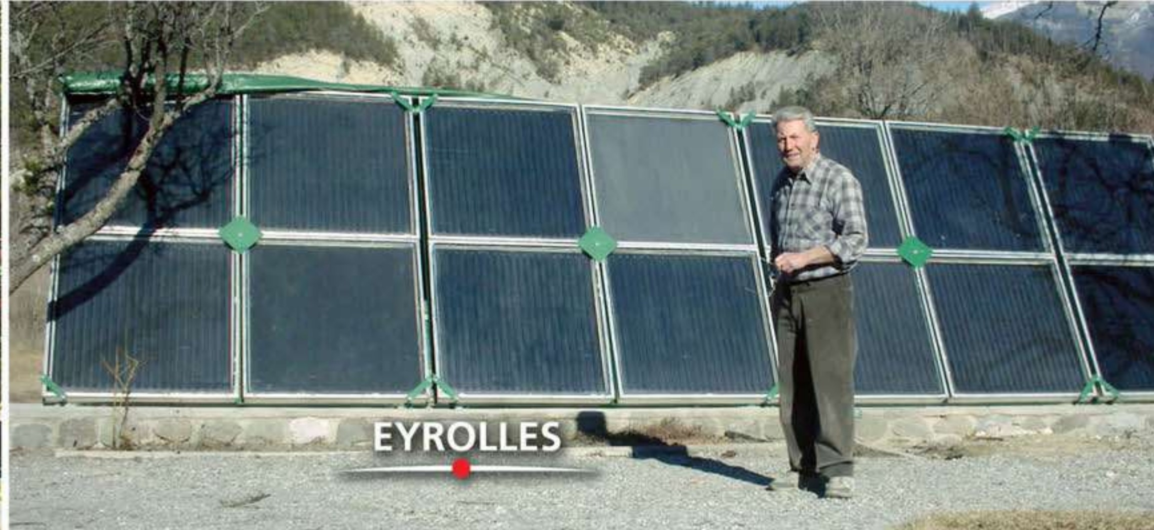




Installer un chauffage ou un chauffe-eau solaire



P. Amet, G. Gourdon, Y. Guern,
R. Jules, E. Marguet et F. Mykieta

Installer un chauffage ou un chauffe-eau solaire

Installer un chauffage ou un chauffe-eau solaire

P. Amet, G. Gourdon, Y. Guern,
R. Jules, E. Marguet et F. Mykieta

EYROLLES

Table des matières

Préface

Le principe du solaire thermique est de convertir la lumière en chaleur en réchauffant un liquide caloporteur, par opposition au solaire photovoltaïque, qui permet de produire de l'électricité. Comme nous le verrons, le solaire thermique offre deux types d'applications, qui peuvent être combinées : alimenter un système de chauffage de la maison et/ou chauffer l'eau chaude sanitaire.

Cet ouvrage rassemble les expériences acquises par ses six auteurs dans les réalisations de leurs installations solaires thermiques. Ils sont membres de l'association pour la promotion des énergies renouvelables (Apper[1]), et issus d'horizons divers (professionnels et simples particuliers).

Le solaire, est-ce rentable ?

Il s'agit de la question clef lorsqu'on s'intéresse au solaire. La rentabilité de cette énergie doit être analysée à court terme et moyen terme, mais aussi à long terme.

Il faut d'abord prendre en compte le coût à court terme et le retour sur investissement. Par an, 2 000 l de fioul (équivalent de 20 000 kWh, 12 stères de bois sec en bûches et 3,5 t de granulés de bois) constituent une charge fixe très importante dans le budget d'une maison individuelle. Que représente un investissement de 5 000 ou 6 000 € dans du matériel solaire au regard de ces charges qui croissent sans cesse ?

Sur le long terme, il faut ajouter le coût global du non-agir. La planète va mal, plus personne ne nie que l'homme en est le principal responsable. Les ressources en énergie s'amenuisent, les prix des énergies flambent, le climat change. Une prise de conscience rapide et profonde s'impose, qui mène naturellement à ces solutions de type énergie renouvelable.

Comprendre, s'approprier, réaliser

Comprendre les fondements de la technique, s'approprier les connaissances, et être capable de réaliser sa propre installation : voici les objectifs que nous nous sommes fixés afin que chacun, en fonction de ses compétences, des moyens et du temps dont il dispose, trouve les bonnes solutions pour s'équiper en solaire thermique.

L'aspect « pratique », immédiatement applicable de cet ouvrage est primordial. C'est une évidence pour les cinq expériences décrites dans la deuxième partie du livre, mais cela s'applique aussi à la partie théorie, qui permet de démystifier les différents aspects d'une installation en les présentant de façon claire et précise. *Installer un chauffage ou un chauffe-eau solaire* propose ainsi une approche aussi exhaustive que possible des divers facteurs à prendre en compte pour passer efficacement au solaire.

1 Le site de l'association : www.apper-solaire.org. Le forum de discussion : http://forum.apper-solaire.org.

Chacun ayant ses propres centres d'intérêts, l'ouvrage a été conçu de façon que les différentes parties puissent être lues indépendamment.

À qui s'adresse ce livre ?

Installer un chauffage ou un chauffe-eau solaire est destiné au particulier désireux de se lancer dans l'autoconstruction d'une installation, du simple chauffe-eau solaire au système chauffage + eau chaude, et au professionnel (artisan, installateur) voulant compléter ses connaissances techniques et découvrir des exemples de réalisations.

Il sera également précieux pour ceux qui désirent s'équiper en solaire thermique et veulent comprendre les devis d'installateurs, avec le vocabulaire technique qui les accompagne, de manière à être des interlocuteurs actifs dans la discussion avec les professionnels.

Un dernier point mérite d'être souligné : le passage au solaire doit être accompagné d'un travail sur l'isolation de l'habitat. Ainsi, à mesure que nous développons notre intérêt pour l'énergie solaire, nous redécouvrons qu'« avant de chauffer moins cher, il faut chercher à chauffer moins ». L'énergie la moins chère, celle qui pollue le moins, est celle que nous ne consommons et ne gaspillons pas.

J'espère que cet ouvrage répondra à vos attentes.

Pierre Amet

Président de l'association Apper

Partie théorie : les bases du chauffage solaire

Cette première partie présente les bases à connaître pour concevoir et dimensionner une installation solaire. L'installation doit être conçue en fonction des besoins de la maison en eau chaude sanitaire (ECS) et en chauffage. Le budget de chauffage étant de loin supérieur à celui d'eau chaude, nous nous intéresserons prioritairement aux systèmes solaires combinés (SSC) – la déclinaison des différentes solutions proposées en chauffe-eau simple étant d'ailleurs d'une approche relativement aisée.

Une analyse de l'ensoleillement local, des possibilités d'implantation des capteurs (orientation, surface, réglementation locale), du budget d'investissement et des besoins en chauffage définira ce qui est appelé la « couverture solaire », c'est-à-dire le pourcentage des besoins de chauffage couverts par l'énergie solaire.

Vous allez découvrir au fil de votre lecture qu'une installation solaire est un tout. Les capteurs doivent ainsi être choisis et dimensionnés en fonction des besoins et des possibilités (le capteur le plus cher n'est pas forcément le plus efficace dans votre contexte). Le surdimensionnement de la surface de capteur est tentant, mais vous trouverez ici pourquoi il vaut mieux éviter d'ajouter deux capteurs de plus. Pensez également que la régulation électronique participe très fortement à l'efficacité du système et à sa longévité. Enfin, la plomberie (tuyaux, pompes, vannes, etc.) reliant les capteurs et le lieu d'utilisation a une importance technique et budgétaire à ne pas négliger.

Il faut enfin revenir sur une idée reçue par le béotien que nous avons tous été : « L'énergie solaire est gratuite et inépuisable. » C'est exact, mais elle n'est pas disponible tous les jours. Sauf installations spécifiques avec un très grand stock (sous forme d'une cuve à eau de plusieurs dizaines de mètres cubes), le chauffage solaire ne peut être autonome. Une installation solaire nécessite donc une seconde source de chaleur pour couvrir les besoins, en particulier lorsque la météo n'est pas favorable.

Définir ses besoins de chauffage

Évaluer les déperditions thermiques de son habitation, et plus globalement les besoins énergétiques du foyer.

Puissance et énergie

Les différentes unités de mesure

Ces quelques pages ont pour but de vous familiariser avec les unités physiques couramment utilisées. Leur lecture peut sembler ardue au premier abord, mais il est difficile de s'en dispenser si l'on veut comprendre précisément comment fonctionne un système de chauffage solaire.

L'énergie (E) est une puissance (P) appliquée pendant un temps. Prenons un exemple : un ballon de 100 l d'eau équipé d'une résistance de 1 000 W (1 kW) mettra 4 h 36 pour chauffer de l'eau de 15 à 55 °C (voir plus bas). Le même ballon équipé d'une résistance de 2 000 W mettra 2 h 18 (soit la moitié du temps) pour réchauffer ce volume d'eau. Le second ballon est plus puissant, mais l'énergie mise en œuvre est la même dans les deux cas ; le coût final au compteur électrique est donc identique.

Les unités officielles du Système international (SI) sont le watt (W) pour la puissance et le joule (J) pour l'énergie. L'énergie est très souvent exprimée dans plusieurs unités : la calorie (cal), le joule (J), le wattseconde (Ws) ou wattheure (Wh).

La calorie est une ancienne unité, qui mesure la quantité d'énergie nécessaire pour élever d'un degré Celsius la température d'un gramme d'eau. Il faut donc 1 000 cal pour arriver au même résultat avec 1 l d'eau.

La calorie, le joule ou le wattseconde sont des expressions différentes de l'énergie, mais elles signifient la même chose : un joule est un watt durant une seconde, soit un wattseconde. Et un joule, ou un wattseconde, correspondent à 0,239 cal.

En matière de chauffage, on utilise surtout une quatrième unité, plus facile à manipuler : le kilowattheure. Il s'agit de l'énergie obtenue en 1 h avec une puissance de 1 000 W.

En résumé

1 J = 1 Ws = 0,239 cal.

1 kWh = 1 000 W pendant 1 h

= 1 000 W x 3 600 s

= 3 600 kJ

= 860,4 kcal.

Applications pratiques

Énergie nécessaire pour un ballon d'eau chaude

Quelle énergie faut-il pour porter 100 l d'eau à une température de 55 °C, en partant de 15 °C ?

La différence de température étant de 40 °C ou 40 K (kelvins) :

- exprimée en calories, E1 = 40 °C × 100 l × 1 000 g = 4 000 000 cal ou 4 000 kcal ;
- exprimée en joules, E2 = 4 000 kcal / 0,239 = 16 736 401 J ou 16 736,4 kJ ;
- exprimée en wattheure, E3 = 16 736 401 J / 3 600 s = 4 649 Wh ;
- exprimée en kilowattheure, E4 = 4,649 kWh (le kilowattheure permet de manipuler des chiffres moins importants).

Ainsi, un ballon électrique devant chauffer 100 l d'eau de 40 °C et équipé d'une résistance chauffante de 1 000 W devra fonctionner durant 4 h 36 (4 649 Wh / 1000 W).

Le même ballon, équipé d'une résistance chauffante de 1 500 W, devrait fonctionner pendant seulement 3 h pour obtenir le même résultat (avec un coût en électricité équivalent).

Il existe une formule raccourcie pour calculer l'énergie nécessaire à partir du volume et de la différence de température (DT). Si nous divisons E3 par E1, nous obtenons un coefficient de 1,16. Ainsi :

100 l d'eau × 40 (DT) × 1,16 = 4,6 kWh.

Le kelvin

La différence de température (autrement dit delta T, ou DT) a pour unité le kelvin (K). Le kelvin est une unité de mesure de la température identique au degré Celsius, à une constante près de – 273,15 °C : 0 °C = + 273,15 K. Pour des différences de température, on a donc 1 °C = 1 K.

Énergie captée par un préparateur d'eau chaude sanitaire

Autre exemple : si nous savons que la température de départ, en début de journée par exemple, d'un préparateur d'eau chaude sanitaire solaire est de 20 °C, et qu'en fin de journée la température stabilisée est de 40 °C, nous avons un écart de température de 20 °C. Ce préparateur a une contenance de 300 l. Nous savons maintenant que l'énergie solaire récupérée est de :

E = 300 × 20 × 1,16 = 7 000 Wh (7 kWh).

À l'inverse, en consommant 1 l de fioul dans une chaudière à (très) bon rendement, l'énergie récupérable est de 10 kWh. Cette énergie appliquée sur ces mêmes 300 l aurait produit un écart de température de 10 000 Wh / (300 × 1,16) = 28,7 °C.

Dernière remarque : 1 000 / 1,16 = 860, il faut 1 kWh pour élever 860 l d'eau de 1 °C. On peut ensuite appliquer une simple règle de trois : pour 10 kWh et 300 l, l'élévation est de 10 × 860 / 300 = 28,7 °C.

Coûts de l'énergie

Le kilowattheure étant l'unité d'énergie de référence, les fournisseurs tels qu'EDF et GDF expriment et facturent l'énergie consommée par le particulier dans cette unité. Nous pouvons ainsi établir une comparaison entre les différentes sources d'énergie en kilowattheure.

Électricité

E = P × t, où P est la puissance des appareils branchés et t le temps en heure pendant lequel ils sont sous tension. Ainsi un convecteur électrique de 750 W branché pendant 5 h aura consommé et dégagé 3,75 kWh.

Rappel : P = U × I, où U est la tension et I le courant. Dans le même convecteur que ci-dessus, pour obtenir une puissance de 750 W sous 230 V, il faut faire circuler un courant de 3,25 A.

Avec un prix moyen constaté de 0,12 € TTC/kWh, 5 h de fonctionnement du convecteur coûtent 0,45 €.

Gaz

Là encore, E = P × t. La consommation de gaz étant exprimée en mètres cubes, GDF a un facteur de conversion tout prêt : E = 11,24 × volume. Ainsi, 1 000 m^3 de gaz produisent 11 240 kWh. Le prix moyen constaté est de 0,04 € TTC/kWh.

Autres énergies

Ce type de calcul peut être fait pour tous les autres types d'énergie, à partir du moment où l'on connaît les volumes et les énergies dégagées.

- 1 l de fioul produit environ 10 kWh d'énergie. En décembre 2007, 1 l de fioul coûte 0,83 € TTC.

- 1 kg de bois en bûches produit environ 3,5 kWh d'énergie (selon les essences de bois et l'humidité résiduelle). Au 1er janvier 2007, un stère de bois coûte entre 50 et 60 € TTC, et produit entre 1 500 et 2 000 kWh.

- 1 kg de granulés de bois produit environ 5 kWh d'énergie (selon les essences de bois, le taux de compression à la fabrication, et l'humidité résiduelle). Au 1er janvier 2007, 1 kg de granulés de bois coûte 0,30 € TTC.

Coûts comparés

Avec ces données, nous pouvons classer les coûts des différentes sources d'énergie, ramenées à 1 kWh produit. Ce sont donc des coûts d'utilisation, hors investissement initial, et en supposant un rendement de 100 %. Les résultats obtenus (pour début 2007) sont synthétisés dans le tableau ci-dessous.

Coûts des sources d'énergie (pour 1 kWh)

	Électricité	Fioul	Pompe à chaleur (g = 3)	Gaz	Bois bûche	Bois de granulés	Solaire
Coût 1 kWh (en €)	0,12	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,00

Coûts actualisés

Le site http://www.industrie.gouv.fr/energie/ fournit des informations actualisées sur le coût des énergies et établit des comparaisons.

Calcul des déperditions

Le calcul des déperditions permet d'obtenir approximativement la puissance nécessaire (on parle bien de puissance, non d'énergie) pour maintenir une température intérieure ambiante donnée en fonction de la température extérieure.

Dans un bâtiment, les déperditions peuvent être estimées par la formule suivante : déperditions (en W) = G × V × DT, où G est le coefficient de déperdition (en W/m^3.K), V le volume chauffé (en m^3), DT la différence de température entre l'intérieur – température ambiante – et l'extérieur (en °C).

Le coefficient de déperdition

Le coefficient de déperdition (G) est donné par la nature de l'habitation chauffée. Plus la maison est construite avec des matériaux modernes et isolée de façon efficace, plus le coefficient est bas.

La température extérieure de base

Pour déterminer la différence de température servant au calcul des déperditions, nous avons besoin de prendre une température extérieure de référence. Météo France donne, par département, cette température extérieure de base, au niveau de la mer. Des corrections doivent ensuite être apportées en fonction de l'altitude du lieu considéré.

Dans un premier temps, il faut repérer sur la carte de la figure 1.1 la température de référence du département considéré du lieu d'habitation, par exemple – 7 °C pour le Loiret.

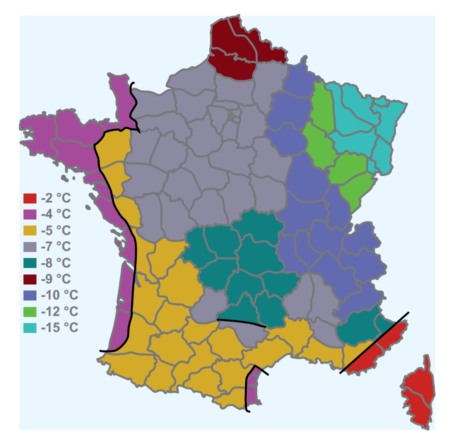


Figure 1.1
Carte de France des températures extérieures de base, au niveau de la mer.

Puis, à l'aide du tableau reproduit en page suivante, on recherche, en fonction de la température extérieure de base au niveau de la mer et de l'altitude du lieu considéré, la température extérieure du site. Ainsi, à 250 m dans le Loiret, on trouve – 9 °C.

La température ainsi obtenue correspond à la température minimale constatée du lieu (dépassée au moins cinq fois par an sur une période de trente ans). Les déperditions du bâtiment à cette température extérieure vont définir la puissance minimale des moyens de chauffage nécessaires pour assurer le confort de la maison dans ces conditions extrêmes.

Applications et résultats

En poursuivant notre exemple du Loiret, nous allons prendre deux types de constructions. La première, récente, réalisée en matériaux modernes, est très efficacement isolée. Elle présente une hauteur sous plafond de 2,50 m et une surface habitable (à chauffer) de 100 m². À titre de comparaison, la seconde construction retenue est plus ancienne, réalisée avec des matériaux traditionnels dans les années 1950. Elle présente une surface habitable équivalente et une hauteur sous plafond de 2,80 m. Dans les deux maisons, la température intérieure ambiante recherchée est de 19 °C.

Coefficient G de différents types de construction

Type de construction	Récente, en Monomur de 37 cm par exemple	Récente avec doublage des murs de 10 cm de laine de roche	Doublage des murs de 10 cm de polystyrène	Doublage des murs de 4 cm de polystyrène	Maison en pierre ou en aggloméré de ciment sans isolation	Ferme, mas provençal, etc.
Date de construction	Après 2000	Après 2000	Années 1980-1990	Années 1980-1990	Années 1950-1970	Antérieur à 1950
Valeur de G	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8

Calcul de la température extérieure du site

Température extérieure du site (°C)	Température extérieure de base au niveau de la mer (°C)									Température extérieure du site (°C)
	- 2	- 4	- 5	- 6	- 7	- 8	- 10	- 12	- 15	
- 2	0 à 200									- 2
- 3	201 à 400									- 3
- 4	401 à 600	0 à 200								- 4
- 5	601 à 700	201 à 400	0 à 200							- 5
- 6	701 à 800	401 à 500	201 à 400	0 à 200						- 6
- 7			401 à 600	201 à 400	0 à 200					- 7
- 8			601 à 800	401 à 500	201 à 400	0 à 200				- 8
- 9			801 à 1000	501 à 600	401 à 500	201 à 400				- 9
- 10			1001 à 1200	601 à 700		401 à 500	0 à 200			- 10
- 11			1201 à 1400	701 à 800		501 à 600	201 à 400			- 11
- 12			1401 à 1700	801 à 900		601 à 700	401 à 500	0 à 200		- 12
- 13			1701 à 1800	901 à 1000		701 à 800	501 à 600	201 à 400		- 13
- 14			1801 à 2000	1001 à 1100		801 à 900	601 à 700	401 à 500		- 14
- 15						901 à 1000	701 à 800	501 à 600	0 à 400	- 15
- 16						1001 à 1100	801 à 900	601 à 700	401 à 500	- 16
- 17						1101 à 1200	901 à 1000	701 à 800	501 à 600	- 17
- 18						1201 à 1300	1001 à 1100	801 à 900	601 à 700	- 18
- 19						1301 à 1400	1101 à 1200	901 à 1000	701 à 800	- 19
- 20							1201 à 1300	1001 à 1100	801 à 900	- 20
- 21							1301 à 1400	1101 à 1200	901 à 1000	- 21
- 22							1401 à 1500	1201 à 1300	1001 à 1100	- 22
- 23							1501 à 1600	1301 à 1400	1101 à 1200	- 23
- 24							1601 à 1700	1401 à 1500	1201 à 1300	- 24
- 25							1701 à 1800		1301 à 1500	- 25
- 26							1801 à 1900			- 26
- 27							1901 à 2000			- 27

Prise en compte de l'altitude du lieu en mètres

Extrait NF P 52-612

La maison moderne

Déperditions = G × V × DT

G = 0,8

V = 100 × 2,5 = 250 m^3

DT = 19 – (– 9) = 28 °C

Déperditions maximales = 0,8 × 250 × 28 = 5 600 W soit 6 kW.

La chaudière à installer (chauffage conventionnel) ne devra pas être d'une puissance inférieure à 6 kW pour pouvoir être efficace lors des grands froids.

La maison ancienne

Déperditions = G × V × DT

G = 1,8

V = 100 × 2,8 = 280 m^3

DT = 19 – (– 9) = 28 °C

Déperditions maximales = 1,8 × 280 × 28 = 5 600 W soit 14 kW.

La puissance de la chaudière à installer (chauffage conventionnel) sera au minimum de 14 kW pour supporter les périodes de grand froid.

Besoins énergétiques de chauffage

Nous venons de voir comment calculer la puissance maximale nécessaire des moyens de chauffage (c'est donc ce qui définit l'investissement). Il s'agit à présent d'évaluer le besoin énergétique annuel moyen – ce qui va définir le coût annuel.

Calcul du besoin énergétique

Une bonne approche des besoins énergétiques de chauffage (Bch) nécessaires à une habitation est de travailler avec la formule suivante : Bch (en Wh) = G × V × DJU × 24, où G est le coefficient de déperdition (en W/m^3.K), V le volume à chauffer (en m^3), DJU les degrés jours unifiés (voir ci-après). Le nombre 24 correspond aux 24 h d'une journée (pour passer de watts.jours en watts.heures).

Nous avons déjà présenté le coefficient de déperdition (voir p. 4), aussi allons-nous nous attacher ici à l'analyse de la seule nouvelle variable, les DJU.

Les degrés jours unifiés

La rigueur climatique d'un lieu d'habitation est quantifiée en degrés jours unifiés (DJU). Les DJU permettent d'intégrer la sévérité du climat dans le calcul du besoin énergétique.

Pour chaque jour, le nombre de degrés jours correspond à la différence entre la température intérieure du local (18 °C) et la moyenne des températures minimale et maximale du jour considéré (soit les températures moyennes quotidiennes). Il est basé sur une période conventionnelle de chauffage de 232 jours, du 1er octobre au 20 mai. Ces moyennes sont calculées sur une période de 30 ans.

Les DJU caractérisent le climat local : ce chiffre est donc le même quel que soit le type d'habitat. Plus il fait froid longtemps, plus il est élevé. Les besoins annuels en chauffage sont donc proportionnels aux DJU.

Le total annuel moyen varie de 1 400 DJU pour la côte Corse à 3 800 DJU dans le Jura. Pour un hiver de rigueur moyenne, le nombre de DJU se situe entre 2 000 et 3 000 dans la majeure partie du territoire métropolitain.

La carte des DJU est remise à jour régulièrement par Météo France (service payant), mais on trouve relativement facilement sur Internet les DJU des principales villes de France.

Applications et résultats

Reprenons les exemples du Loiret, avec deux constructions de natures très différentes.

La maison moderne

Bch = 24 × G × V × DJU

G = 0,8

V = 100 × 2,5 = 250 m^3

DJU = 2 600 (ils sont multipliés par 24 dans la formule pour avoir des kilowattheures)

Soit Bch = 24 × 0,8 × 250 × 2 600 ≃ 12 500 kWh

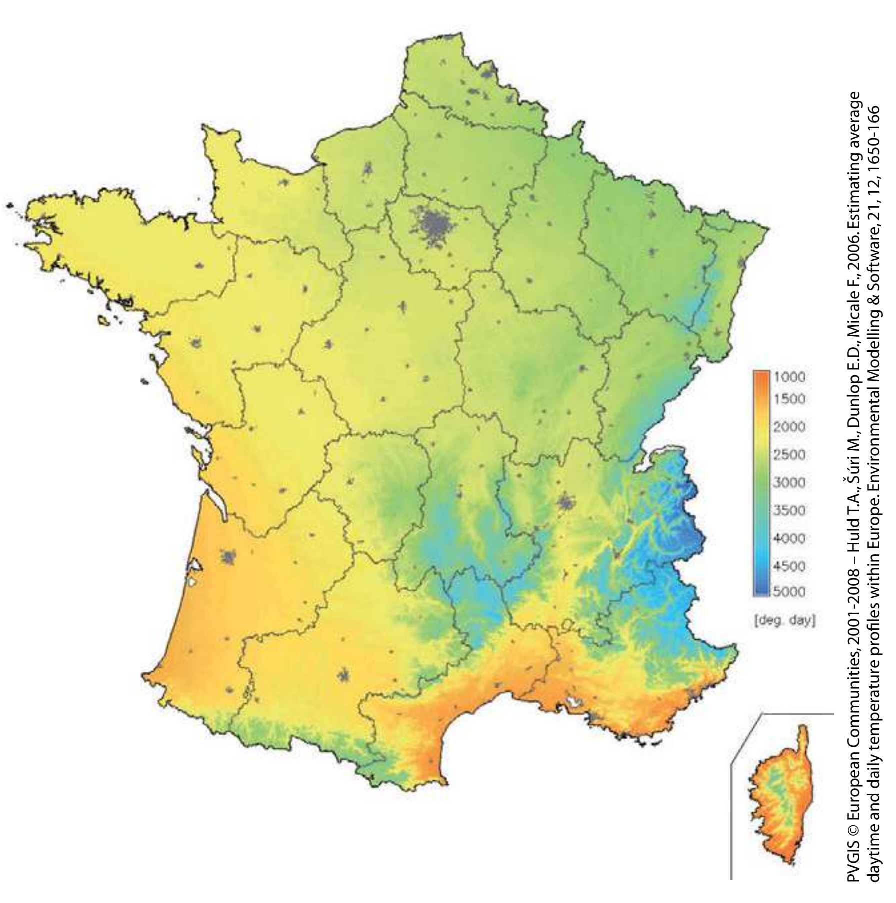


Figure 1.2
Carte des DJU.

Les DJU sont donnés pour une température de 18 °C. Pour obtenir une température de confort de 19 °C, il faut ajouter au calcul que nous venons de faire l'énergie nécessaire pour 1 °C de plus pendant la période de chauffe (soit 232 jours) :

Bch 18-19 °C = $24 \times 0,8 \times 250 \times 232 \simeq 1\,100$ kWh

Cette maison consommera donc 13 600 kWh d'énergie pour ses besoins annuels de chauffage. Le besoin journalier sera en moyenne de 13 600 / 232 = 58 kWh.

Si l'on souhaite avoir une température intérieure de 22 °C, il faudra 4 300 kWh de plus, soit 36 % du besoin initial.

La maison ancienne

Bch = $24 \times G \times V \times DJU$

G = 1,8

V = $100 \times 2,8 = 280$ m^3

DJU = 2 600

Bch = $24 \times 1,8 \times 280 \times 2\,600 \simeq 31\,500$ kWh

Pour une température de référence de 19 °C, il faut ajouter :

Bch 18-19 °C = $24 \times 1,8 \times 280 \times 232 = 2\,800$ kWh

Cette maison consommera donc 34 000 kWh d'énergie pour ses besoins annuels de chauffage à 19 °C, et 43 000 kWh à 22 °C.

Besoins énergétiques en eau chaude sanitaire

Calcul du besoin énergétique

L'appréciation des besoins énergétiques de l'eau chaude sanitaire (Becs) s'évalue très simplement. La formule indiquée p. 3 parle d'elle-même : Becs (en Wh) = $Q \times DT \times 1,16$, où Q est la quantité d'eau à chauffer, DT l'écart de température entre l'eau considérée chaude et l'entrée d'eau froide, et 1,16 le facteur de conversion de Cal en Wh.

Applications et résultats

Considérons une famille de quatre personnes consommant quotidiennement 200 l d'eau chaude (douche, cuisine, etc.). Sur l'année, cette famille consommera $200 \times 365 = 73$ m^3 d'eau chaude sanitaire. En supposant une élévation de température de 40 °C pour passer de 15 °C (température de puisage) à 55 °C (température de tirage), le besoin annuel en énergie pour l'eau chaude sanitaire sera le suivant :

Becs = $73\,000 \times 40 \times 1,16 \simeq 3\,400$ kWh.

Le besoin journalier est donc de 9,3 kWh.

Les besoins énergétiques pour l'eau chaude sanitaire représentent 25 % des besoins de chauffage de la maison bien isolée, et 10 % de ceux de la maison ancienne. Vous l'aurez compris, la principale conclusion à tirer de cette partie est qu'il faut isoler avant de penser à changer d'énergie. Les kilowattheures non consommés sont les moins chers !

Capter la chaleur

Nous allons aborder ici trois sujets avec lesquels il est nécessaire de se familiariser pour construire un système solaire : l'énergie disponible, l'orientation des capteurs et le choix du type de capteur.

Une surface de 1 m^2 face au soleil reçoit par temps clair une puissance que l'on peut évaluer en moyenne à 1 000 W. Lorsque le soleil est bas sur l'horizon (matin, soir, hiver), l'épaisseur d'atmosphère à traverser est plus grande, et la puissance solaire diminue. Un capteur solaire fonctionne avec l'énergie directement émise par le soleil, mais aussi avec celle diffusée par l'atmosphère (c'est la lumière qui nous éclaire en cas de couverture nuageuse).

Figure 2.1
Orientation du capteur par rapport au soleil à 9 h et à 12 h. En général, il est impossible d'avoir des capteurs placés face au soleil toute la journée, ou toute l'année.

Ce second type d'énergie est plus faible (inférieure ou égale à 20 % de l'énergie solaire totale par beau temps), mais ne doit pas être négligé pour autant.

Le calcul de l'énergie disponible est détaillé dans la première partie de ce chapitre.

Ainsi, sur la figure 2.1, qui représente la position du soleil à 9 h et à 12 h, la surface apparente du capteur le matin vis-à-vis de celle à midi est divisée par deux. Autrement dit, orienté de cette façon, le capteur ne capte que la moitié de l'éclairement disponible le matin.

La variation d'angle à prendre en compte n'est pas uniquement sur le plan horizontal (d'est en ouest). En effet, entre l'été et l'hiver, la variation de l'angle dans le plan vertical est de 46°. Il est donc important de trouver aussi un angle optimal des capteurs dans le plan vertical.

Comme nous le verrons plus loin (voir p. 9), l'orientation optimale de vos capteurs est fonction de votre lieu d'habitation, de vos contraintes d'implantation et de vos besoins saisonniers.

Les capteurs thermiques solaires sont des systèmes qui absorbent l'énergie lumineuse et la cèdent sous forme de chaleur à un liquide qui y circule. Le tuyau d'arrosage dans le jardin l'été est le premier capteur de ce type, mais nous verrons plus sérieusement dans ce chapitre les deux principaux types de capteurs pour eau chaude sanitaire et système solaire combiné : les capteurs à tubes sous vide et les capteurs plans.

L'énergie disponible

Il est avéré que le gisement solaire est plus important dans le sud de la France que dans le nord. Dès lors, est-il forcément plus rentable d'installer un système solaire thermique dans le sud ?

La question ne devrait pas être posée en ces termes. Il faut plutôt chercher à savoir si notre besoin de chauffage peut être satisfait en totalité ou en partie par le rayonnement solaire disponible.

On pourrait faire le parallèle avec l'exploitation durable d'une petite surface forestière. Doit-on s'abstenir d'exploiter une petite surface forestière sous prétexte qu'elle produira forcément moins qu'une plus grande ? Si cette surface correspond aux besoins, n'est-ce pas suffisant ?

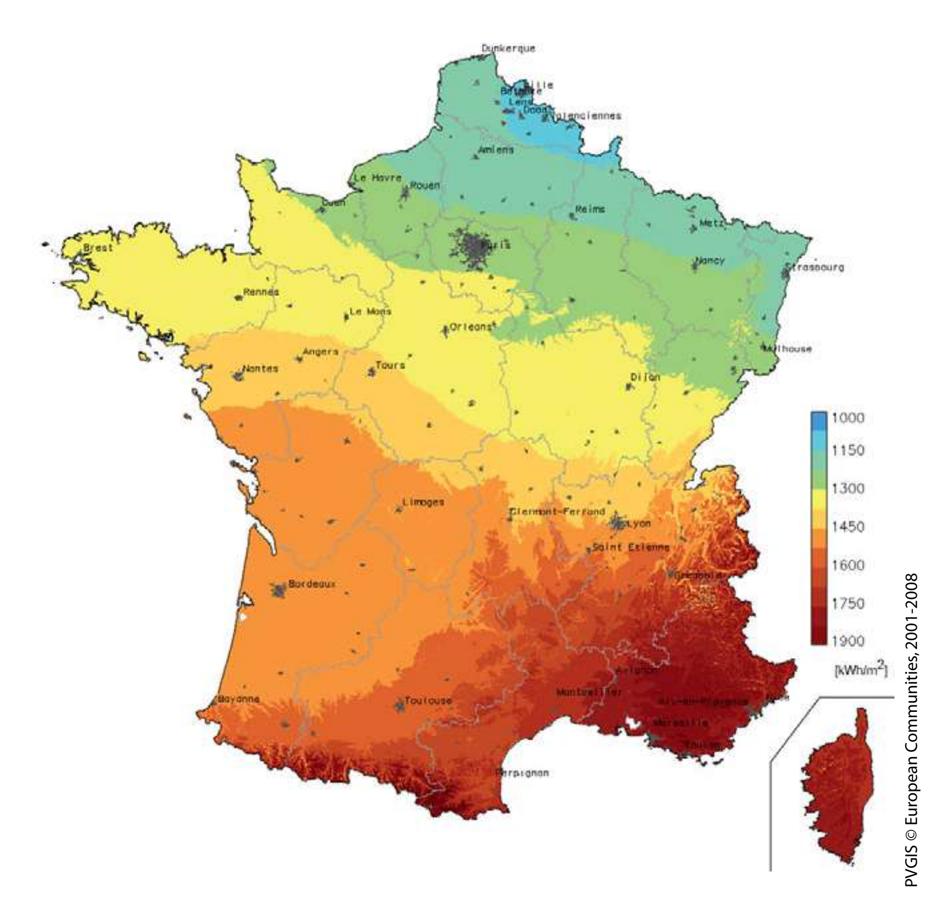


Figure 2.2
Gisement solaire annuel, exprimé en kilowattheures par mètre carré avec un champ de capteurs inclinés à la latitude du lieu.

L'été, le solaire fonctionne partout. Que l'on soit à Lille ou à Marseille, l'ensoleillement est toujours largement suffisant.

La question est donc de savoir ce qu'il est possible et raisonnable de faire en hiver. Quel sera l'apport de notre système solaire thermique à notre chauffage traditionnel (gaz, fioul, bois, électricité directe par convecteurs ou indirecte avec pompe à chaleur) ?

En appoint de chauffage d'habitation, en supposant un besoin journalier de 60 kWh pour une maison de 120 m², nous pouvons envisager sérieusement, avec un champ de capteurs de 12 m² (10 % de la surface d'habitation) et un rendement de 50 %, un apport de 40 % dans le sud de la France, de 25 % sur une grosse partie du territoire et de 15 % dans le nord.

En appoint de chauffage de l'eau chaude sanitaire, en considérant que cet appoint peut n'être que partiel, et pour augmenter de 25 °C la température de 200 l d'eau (quatre personnes à 50 l chacun), on peut évaluer un besoin de 6 kWh. Un champ de capteurs de 6 m² (toujours avec un rendement de 50 %) permettra de remplir ces besoins dans le nord de la France, un champ de capteurs de 4 m² dans la presque totalité du territoire, et un champ de capteurs de 2 m² dans le sud.

Le solaire trouve donc sa place sur l'ensemble du territoire, ce qui est confirmé par le fait que l'Allemagne est beaucoup mieux équipée en capteurs solaires que la France.

L'orientation et l'inclinaison des capteurs, les masques

L'orientation

Beaucoup de candidats à l'énergie solaire hésitent à franchir le pas de l'installation, car ils se heurtent à un problème d'orientation des capteurs solaires. Un champ de capteurs solaires doit-il vraiment être installé plein sud ?

Le graphique de la figure 2.3 représente, pour chaque mois de l'année, la perte d'énergie entre un panneau orienté plein sud et un panneau présentant une orientation différente. Que constate-t-on ?

En été, les valeurs obtenues entre une orientation plein sud 0° et une orientation à 75° vers l'est ou vers l'ouest ne varient presque pas. Si on souhaite installer une eau chaude sanitaire solaire dans une résidence secondaire occupée en été (ou pour toute autre activité saisonnière tel que le camping), ce paramètre peut donc être négligé.

En hiver, la variation existe, mais elle n'est pas très importante. Si nous comparons les valeurs d'une orientation plein sud 0° et celles d'une orientation à 30°, les écarts ne sont que de 5 à 7 %. Ainsi, placer

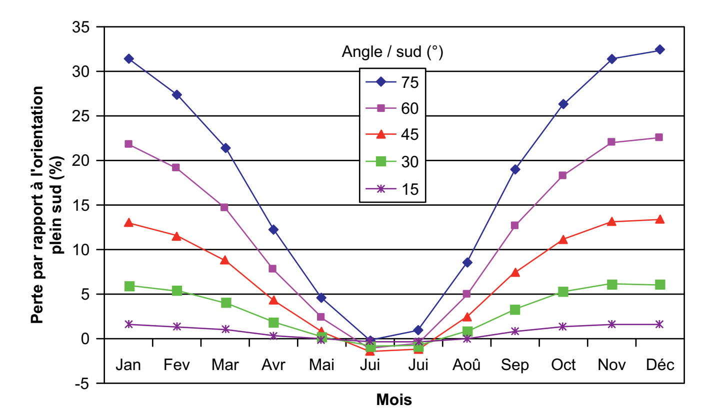


Figure 2.3
Variation de l'efficacité des panneaux solaires en fonction de l'angle sud.

ses capteurs solaires avec une incidence d'angle d'une trentaine de degrés par rapport au sud ne modifie pas de façon significative les performances de l'installation.

En réalité, même si une orientation plein sud 0° peut sembler optimale, dans beaucoup de régions il faut compter avec la météo locale. La Picardie, par exemple, connaît tout au long de l'année, et surtout à la mi-saison, un brouillard matinal. Le temps se lève souvent vers 10 h ou 11 h. Une orientation de 30° vers l'ouest ne changera donc pas fondamentalement la quantité théorique d'énergie récupérable, mais améliorera fortement le rendement effectif du système, car le champ de capteurs est optimisé pour l'ensoleillement de l'après-midi.

Dans les régions montagneuses des Pyrénées, une couverture nuageuse arrive souvent en fin d'après-midi, avec parfois orage et pluie. Une orientation de 30° vers l'est permettra donc de tirer parti de la matinée ensoleillée.

L'inclinaison

L'inclinaison est fonction de l'énergie que l'on souhaite récupérer : le champ de capteurs doit-il produire de l'énergie pour un appoint au chauffage, pour un chauffe-eau solaire, ou pour les deux ? D'autre part, est-on équipé d'un circuit de décharge (chauffage de la piscine par exemple) ?

Selon les réponses obtenues, on inclinera le champ de capteurs à 20°, 45°, 60° ou 90°, comme nous allons le voir dans les exemples présentés ci-dessous.

À Paris

Le graphique de la figure 2.4 montre différentes courbes qui indiquent les quantités d'énergie générées à Paris, tout au long de l'année, en fonction de différentes inclinaisons.

Nous observons que, en été, plus l'inclinaison du champ de capteurs est faible, plus la quantité d'énergie produite est importante. Pendant les mois d'hiver en revanche, l'énergie produite se situe à environ 1 000 Wh/m².jour quelle que soit la courbe. Plus l'inclinaison est forte, plus la différence entre les quantités d'énergie récupérées en été et en hiver diminue (tableau ci-après). On peut ainsi dimensionner le système de façon qu'il ait une efficacité optimale en hiver sans prendre trop de risque de surchauffe en été.

Nous remarquons également que plus le capteur est proche de la verticale, plus il atteint sa saturation (son maximum d'énergie captable) tôt dans l'année, et plus longtemps il conserve sa saturation tard dans l'année. Ceci est un aspect important pour un appoint au chauffage.

Dans le nord de la France, le chauffage des habitations est définitivement coupé vers le 15 mai et est remis en marche vers le 15 septembre. Certaines années, il

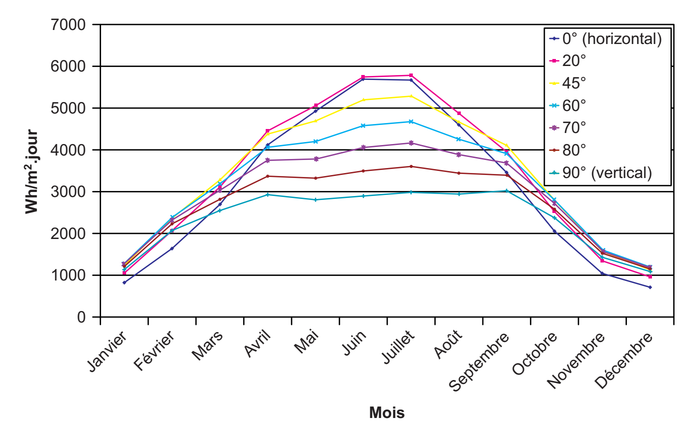


Figure 2.4
Irradiation du soleil à Paris, orientation plein sud 0°.

Variation de la production avec l'inclinaison

Inclinaison des panneaux	Proportion d'energie recuperee entre ete et hiver
0 ou 20°	5 à 6 fois plus en été
60°	4,5 fois plus en été
70°	4 fois plus en été
80°	3,5 fois plus en été
90°	3 fois plus en été

a été observé que le chauffage pouvait même être coupé le 15 juillet pour être remis en marche autour du 15 août. Ce n'est jamais un chauffage fort, mais il maintient la température et permet une déshumidification.

Quelle que soit l'inclinaison, même si l'énergie solaire n'est pas importante durant les mois de novembre, décembre, janvier et février, nous pouvons obtenir environ 3 000 à 4 000 Wh/m² par jour à l'intersaison, en septembre-octobre et mars-avril-mai.

Sur une maison moyenne de 80 m², relativement récente, nous pouvons calculer les pertes thermiques (et donc l'énergie nécessaire au maintien en température) ainsi :

surface × hauteur × G × DT = 80 m² × 2,5 m × 1 × 10 = 2 000 W.

Ainsi, sur la période nocturne, les pertes sont d'environ 24 kWh par jour (2 kWh × 12 h). Un champ de capteurs de 8 m² couplé à une réserve d'eau morte de 1 000 l portée à 50 °C dans la journée suffit à générer l'énergie du maintien en température de cette maison durant la période de mars à juin puis de septembre à octobre. Cela représente une économie d'environ 400 € par an (comparé au coût de l'électricité).

Avec une inclinaison à 45°, nous ne saurons pas récupérer l'énergie en excédent l'été. Mais avec une inclinaison à 90° (champ à la verticale), nous pouvons dimensionner le champ sans inquiétude de sa saturation durant la période estivale.

À Marseille

Observons à présent ce qu'il en est avec une météo différente, à Marseille par exemple.

Si les courbes présentées sur la figure 2.5 sont globalement de même nature que celles du graphique précédent (figure 2.4), des différences intéressantes peuvent être soulignées. Alors que sur une latitude plus haute l'apport d'énergie minimal était de 1 000 Wh/m².jour, à Marseille, nous pouvons récupérer 3 000 Wh/m².jour quasiment sur toute l'année si l'inclinaison du champ de capteurs est supérieure à 20°.

Avec ce type d'inclinaison, nous voyons que, lorsque l'on en a réellement besoin (en hiver), l'énergie récupérable est quasiment toujours la même. En revanche, plus le champ de capteurs est fortement incliné, plus la saturation intervient rapidement et est quittée tard dans l'année. Pour les inclinaisons de 80° et 90°, nous observons même que nous récupérons plus d'énergie au printemps et en automne qu'en été. Placer un champ de capteurs solaires à la verticale est donc une bonne option technique.

Le surdimensionnement

Profitons des graphiques précédents (figures 2.4 et 2.5) pour analyser plus en détail les problèmes de surdimensionnement. Supposons que vous vouliez faire de l'appoint au chauffage pour couvrir un besoin de 50 kWh, et que vous n'ayez pas d'autres moyens que de placer vos capteurs à l'horizontale. Vous décidez alors d'augmenter la surface de capteurs.

Premières conséquences immédiates : l'infrastructure doit augmenter (pompes, diamètre des tuyaux, surface occupée, etc.), pas forcément de façon proportionnelle.

Et surtout, vous aurez un très grand surplus d'énergie en été. D'après les courbes correspondant à Marseille, il

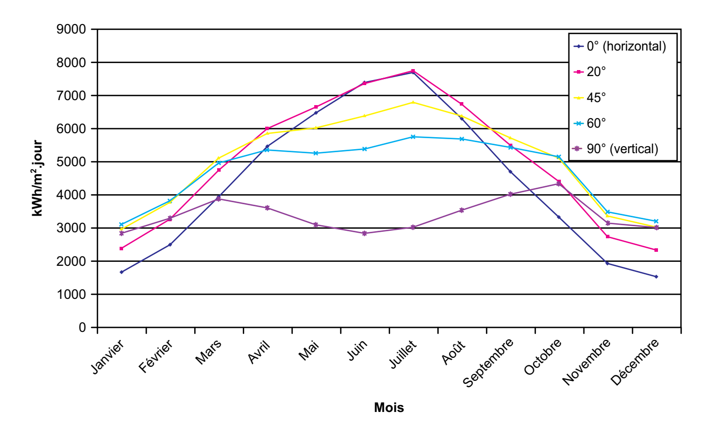


Figure 2.5
Irradiation du soleil à Marseille, orientation plein sud 0°.

faut 50 kWh / 1,5 = 33 m² pour couvrir le besoin. En été, vous disposerez alors de 33 × 8 000 = 264 kWh dont vous ne saurez pas quoi faire. Cela correspond à la quantité d'énergie qu'il vous faut pour faire bouillir cinq ballons de 400 l initialement pleins de glace, et cela tous les jours !

On le devine : il vaut mieux éviter de laisser les capteurs chauffer l'été sans rien faire pour préserver leur durée de vie. La situation est d'autant plus problématique lorsque la maison est inoccupée, ce qui réduit encore la proportion d'énergie consommée.

Il existe plusieurs solutions au surdimensionnement.

- Se débarrasser des calories en faisant circuler l'eau dans un radiateur extérieur situé au nord, ou en chauffant l'eau de la piscine (c'est une installation classique, un peu plus complexe, mais qui n'est pas applicable, ou suffisante, dans les régions où l'eau du bain est déjà trop chaude) ou encore en faisant circuler l'eau du tampon dans les capteurs la nuit (l'eau à chauffer au petit matin est ainsi plus froide, et on peut espérer qu'elle sera loin de l'ébullition le soir).
- Renoncer à une couverture à 100 % l'hiver et utiliser l'énergie pour produire l'eau chaude sanitaire.
- Incliner les capteurs le plus possible pour les rendre inefficaces l'été.
- Couvrir une partie de ces capteurs l'été. C'est une solution plus compliquée qu'il y paraît, notamment lorsque les capteurs sont placés sur le toit. Soyez en particulier attentif à la prise au vent de cette couverture.
- Installer une visière sur les capteurs. Là aussi, il faut faire attention au vent.

Revenons à notre exemple : on préférera placer des panneaux orientés à 60°, qui permettent d'envisager un dimensionnement raisonnable de 15 m² pour couvrir les besoins hivernaux. En été, on se débarrassera de 82 kWh, de quoi faire bouillir encore presque deux ballons de 400 l.

Un dimensionnement correct, qui est gage de longévité des capteurs, doit absolument prendre en compte ce problème de surproduction estivale.

Le masque solaire

Avant toute installation d'un champ de capteurs solaires, il est impératif d'effectuer un relevé des masques solaires éventuels : immeuble voisin, arbre, etc. En effet, nombreux sont ceux qui se sont fait piéger par une sous-évaluation des obstacles – il ne faut pas oublier que, durant l'hiver, le soleil est 45° plus bas que durant l'été. Ils s'aperçoivent trop tard (l'hiver suivant) qu'une partie de la journée le champ de capteurs est à l'ombre.

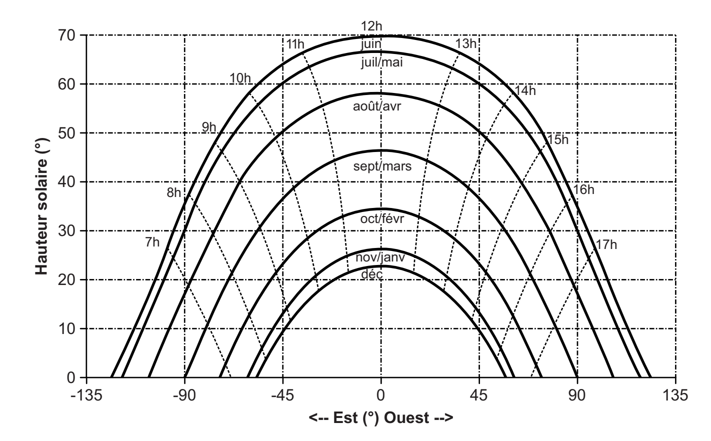


Figure 2.6
Diagramme solaire à 44° N de latitude.

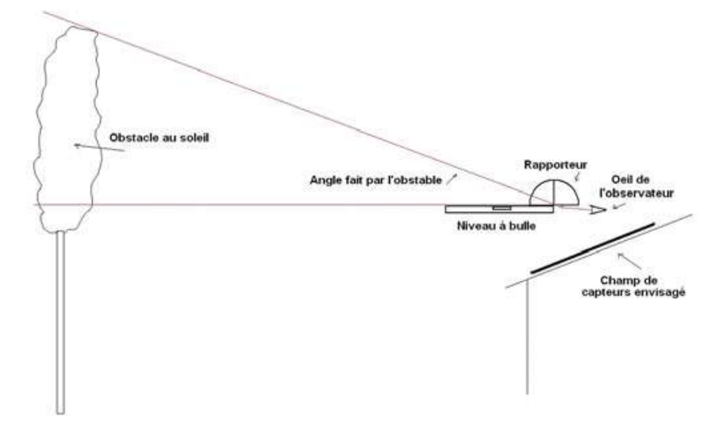


Figure 2.7
Dessin correspondant à la photographie panoramique, représentant l'obstacle.

Pour éviter les mauvaises surprises, on effectue des relevés. Il faut s'équiper d'une boussole, d'un rapporteur, d'un niveau à bulle (avec cale éventuelle), d'un crayon et d'un diagramme solaire.

La figure 2.6 est un exemple de diagramme solaire à 44° de latitude. Les courbes représentent, pour différents mois de l'année, la position (hauteur et orientation est-ouest) du soleil en fonction de l'heure solaire (indiquée dans les bulles).

Le diagramme solaire doit être celui applicable à la latitude du lieu considéré. De nombreux sites Internet en proposent, des plus simples aux plus complexes – une requête sur un moteur de recherche permet de trouver aisément les informations nécessaires.

On se place au droit de l'emplacement où les capteurs seront installés, les yeux au centre de ce qui sera le champ de capteurs. On se positionne plein sud par rapport aux capteurs (à l'aide de la boussole), et on regarde à 90° plein est et plein ouest. Avec le rapporteur, on relève les angles que forment les obstacles à l'horizon, et on reporte ces données sur le diagramme solaire. Les obstacles n'ont pas besoin d'être reportés avec soin, ils peuvent être simplement signalés grossièrement.

▶ Premier exemple, presque idéal

Grâce à la figure 2.9, qui correspond à la situation illustrée par la photographie 2.8, nous pouvons tirer nos premières conclusions. Toute la journée, toute l'année ou presque, de 7 h à 18 h, le champ de capteurs recevra les rayons du soleil. Notre position est bonne malgré un obstacle relativement haut : la surface ombrée est assez importante, mais elle n'occulte le champ de capteurs qu'aux heures les moins utiles. Cet exemple est presque idéal.



Figure 2.8
Photographie prise un soir de printemps, soleil couchant à droite.

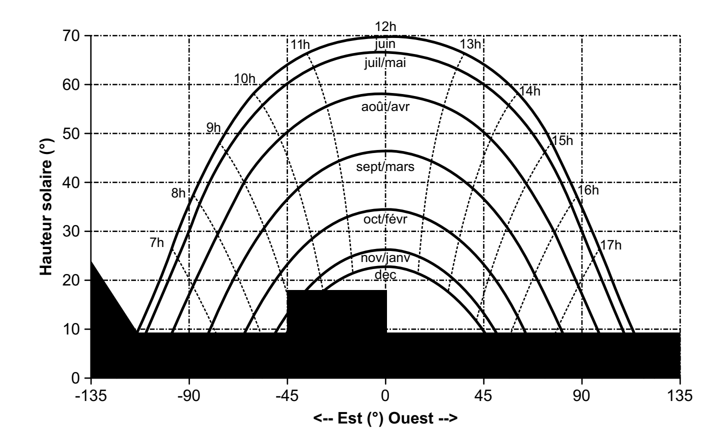


Figure 2.9
Diagramme solaire avec masques solaires placés, correspondant à la figure 2.8.

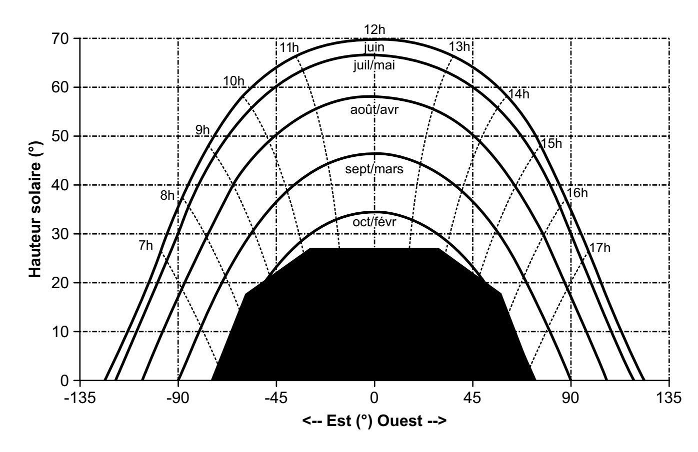


Figure 2.10
Diagramme solaire – positionnement non optimal des capteurs.

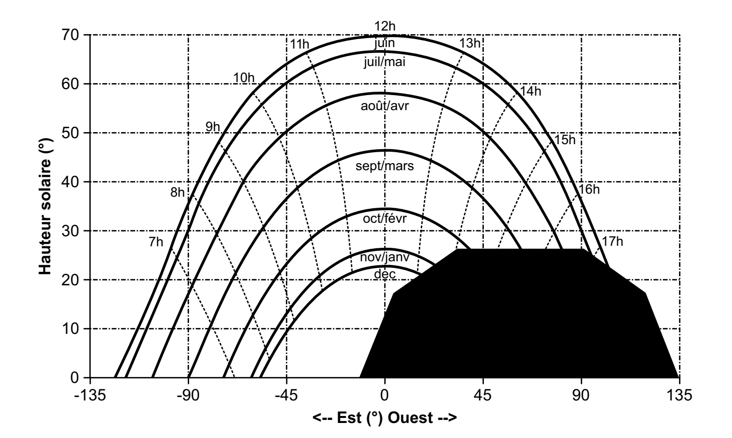


Figure 2.11
Diagramme solaire – positionnement optimisé des capteurs.

▶ Deuxième exemple, observé régulièrement

Devant notre champ de capteurs situé plein sud, nous avons un horizon dégagé avec juste un petit monticule. La position de ce monticule est capitale.

Sur les deux diagrammes des figures 2.10 et 2.11, avec une même surface occultée mais une position légèrement différente du champ de capteurs par rapport au monticule, nous avons des résultats très différents. Dans le premier cas, aucune énergie ne sera récoltée en décembre et en janvier ; dans le deuxième, on récupère plus de 50 % de l'énergie totale.

> **Pour simplifier**
>
> On peut considérer que seuls les masques compris dans un angle de +/– 60° autour de l'orientation centrale sont à prendre en compte.

Les différents types de capteurs

Capteurs plans

Le capteur plan est le type de capteur solaire le plus utilisé.

Composition

Un capteur plan est composé d'un coffret isolant, généralement en aluminium, sur lequel est collée ou jointoyée une vitre. À l'arrière et sur les côtés est placée une couche isolante en polyuréthane, laine de verre ou laine de roche. À l'intérieur est posée une plaque métallique noire permettant d'absorber le rayonnement solaire. Des tuyaux en cuivre ou en inox sont soudés sur cette plaque pour permettre le transport des calories récoltées vers l'unité de stockage. L'absorbeur peut être recouvert d'un revêtement sélectif qui améliore les performances.

Fonctionnement

La vitre, transparente, crée les conditions d'un effet de serre : elle laisse passer le rayonnement solaire visible et ne renvoie pas vers l'extérieur les rayonnements infrarouges émis par la plaque d'absorption. L'absorbeur tend à perdre ses calories sous l'effet de la circulation du fluide solaire dans la tuyauterie placée contre lui ; elles sont remplacées par celles résultant de la continuité du rayonnement solaire.

Les tubes sont soit reliés en série pour former un serpentin, soit raccordés de chaque côté à un tube collecteur de plus gros diamètre : on parle alors de capteur « échelle » (c'est la configuration la plus répandue). Page 38, nous verrons l'influence du type de montage sur le dimensionnement des tuyaux.

Rendement

Le rendement d'un capteur plan est de l'ordre de 50 % : sur les 100 % de rayonnement solaire émis, une moitié environ est perdue, comme représenté sur la figure 2.13.

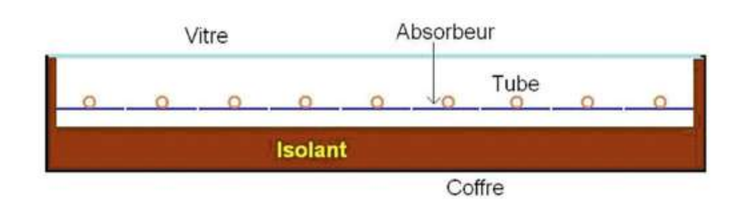


Figure 2.12
Capteur plan (coupe).

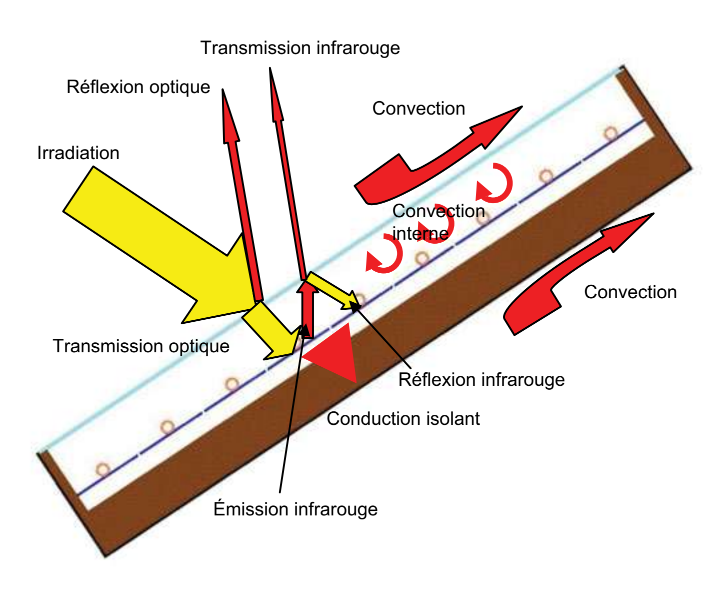


Figure 2.13
Les pertes d'énergie du capteur plan.

Environ 20 % repart vers l'extérieur sous forme de réflexion du rayonnement. Cette perte varie au cours de la journée, car elle dépend de l'incidence du rayon. La plus grosse part est causée par la réflexion sur la vitre, mais il y a également des pertes secondaires par réflexions multiples.

Entre 0 et 100 % (30 % en moyenne) du rayonnement est perdu par échanges thermiques. Il se produit dans le capteur des échanges de chaleur par convection entre l'absorbeur (chaud) et la vitre (plus froide), ainsi qu'entre la vitre (chaude) et le milieu ambiant (air extérieur). Bien entendu, plus le vent est important, plus ces pertes le sont. On note également des pertes par conduction dans l'isolant, même s'il est de bonne qualité : il reçoit une partie de la chaleur émise par l'absorbeur et transmet cette chaleur au cadre. Enfin, l'absorbeur tend à perdre de la chaleur par radiation au fur et à mesure de son élévation de température : plus l'absorbeur est chaud, plus il transmet sa chaleur au milieu ambiant.

De façon générale, plus l'écart de température entre l'absorbeur et l'air ambiant extérieur est important, plus ces pertes sont importantes – et donc moins le rendement du capteur est bon.

Ce qui reste (après ces 0 à 100 % de pertes) constitue la partie utile de l'énergie. Elle est transmise au fluide par les tubes du capteur.

Lorsque les pertes thermiques sont égales à 100 %, on a atteint la température dite de stagnation : toute l'énergie absorbée est perdue en échanges thermiques avec l'extérieur. C'est ce qu'il se passe lorsque aucun fluide ne circule dans le capteur.

Capteurs à tubes

Un capteur solaire à tubes est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre. Dans chaque tube sont placés un absorbeur (pour capter le rayonnement solaire) et un échangeur (pour permettre le transfert de l'énergie thermique). Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de



Figure 2.14
Les extrémités argentées des tubes du capteur, témoins du vide.

l'absorbeur ; l'absorbeur reçoit un traitement (sous forme d'une « peinture » spécifique) pour empêcher les pertes par rayonnement. On obtient ainsi des capteurs solaires performants, sans isolation thermique rapportée ni coffre de protection.

Pour être efficace, le vide doit être poussé à moins de 10^{-3} Pa. Un tube devient inutile s'il n'est pas totalement hermétique, et il faut le changer pour préserver la performance de l'ensemble du capteur. Les tubes sont munis d'un témoin (getter) constitué d'une couche de baryum déposée sur l'intérieur du tube pendant la fabrication. Cette couche de baryum devient blanche au contact avec l'air et sert ainsi de témoin en cas de perte de vide.

Deux types de tubes sous vide

Deux types de tubes sous vide existent actuellement : les tubes à une seule paroi et les tubes de type Thermos.

▶ Tubes à une seule paroi

Les tubes à une seule paroi de verre semblent au premier regard fragiles, mais il n'en est rien. L'épaisseur de la paroi de verre (environ 2 mm) ainsi que la technologie utilisée pour faire l'étanchéité (qui doit être parfaite) de la liaison en bout de tube avec le métal de l'échangeur en font un matériel d'excellente facture. Dans ces tubes sont insérés, comme pour les capteurs plans, un absorbeur en métal relié à un tube effectuant l'aller-retour d'un bout à l'autre du tube.

▶ Tubes de type Thermos

Les tubes de type Thermos sont constitués de deux tubes, l'un intérieur, l'autre extérieur. Le tube intérieur sert d'absorbeur car la surface est traitée pour être absorbante et sélective : elle capte le rayonnement solaire, mais, en chauffant, n'émet que très peu de rayonnement infrarouge. La chaleur est transmise hors de l'enveloppe sous vide du tube par la circulation d'un fluide en contact avec l'absorbeur dans un caloduc ou un tube en forme de U (appelé U-Pipe).

La technique du tube Thermos a été développée tout d'abord à l'université de Sydney (Australie). Actuellement, elle est exploitée presque exclusivement en Chine, où quelque cinq millions de mètres carrés de capteurs à tubes sous vide sont fabriqués chaque année. Considérée comme « high-tech » en Europe, cette technique représente 65 % du marché chinois. La fabrication des tubes et l'assemblage des capteurs sont simplifiés, car il n'y a pas de soudures entre le verre et le métal.

Les différentes technologies internes des capteurs à tubes

Par opposition au capteur plan, où l'entrée et la sortie se font le plus souvent respectivement en bas et en haut du capteur, les liaisons de raccordement du capteur à tubes sous vide se font le plus souvent à droite et à gauche du collecteur principal situé en partie haute.

▶ Le capteur à tubes sous vide à circulation directe

Cette technique a été développée il y a une trentaine d'années afin d'améliorer les performances d'un capteur plan. La conception de l'absorbeur et des tuyaux de circulation du fluide caloporteur est identique à celle d'un capteur plan, mais l'ensemble est suffisamment étroit pour être glissé à l'intérieur d'un tube en verre. L'air à l'intérieur est évacué pour faire le vide, et le tube est fermé hermétiquement. Le principe est simple, mais la fabrication est difficile à cause des liaisons entre verre et métal nécessaires pour la circulation du fluide caloporteur.

▶ Le caloduc

C'est un système à liaison sèche : il n'y a pas de circulation de liquide entre le tube et le caloduc.

Dans le tube en verre est introduit un tube de cuivre de 8 mm de diamètre, à l'extrémité duquel est soudé un diffuseur de 14 mm à 26 mm de diamètre. Une goutte d'eau distillée, ou une goutte d'acétone, est placée à l'intérieur de ce tube en cuivre. Il est refermé après y avoir effectué

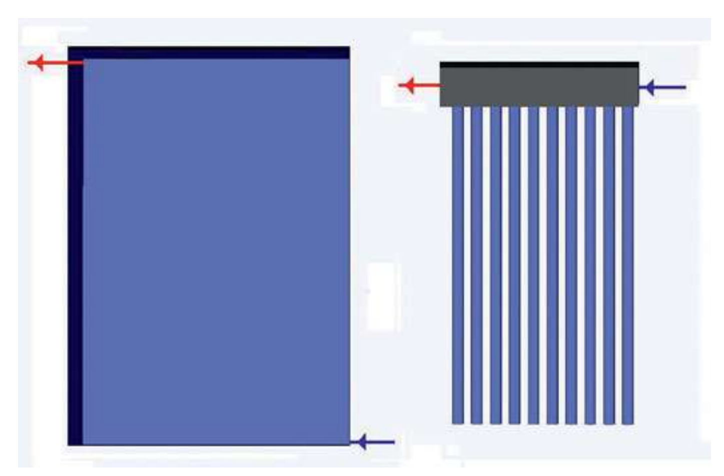


Figure 2.15
À gauche : liaisons de raccordement d'un capteur plan. À droite : liaisons de raccordement d'un capteur à tubes sous vide.

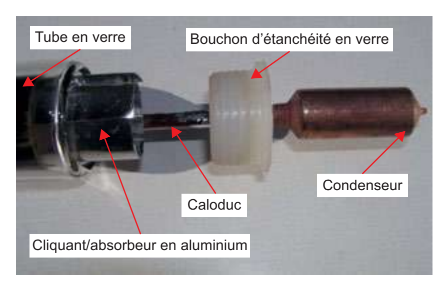




Figure 2.16
Exemple d'un tube sous vide équipé d'une liaison à caloduc.

un tirage au vide. Le vide permettant de diminuer la température d'évaporation du fluide placé à l'intérieur, le capteur fonctionne dès 25 °C, mais le procédé d'évaporation et de recondensation fait qu'on ne peut pas placer ces tubes strictement à l'horizontale. Une inclinaison de l'axe du tube d'au moins 10° par rapport à l'horizontale est obligatoire. Il peut être procédé au changement d'un ou plusieurs tubes (pour maintenance), même en laissant l'installation en fonctionnement (circuit en charge) : le fluide solaire ne circulant pas dans les tubes mais dans le collecteur principal, les tubes avec leur caloduc peuvent être désolidarisés du collecteur principal.

▶ Le U-Pipe

Dans un capteur à tubes sous vide équipé d'une technologie U-Pipe, l'ensemble du collecteur forme un grand serpentin dans lequel chacune des spires est insérée dans un tube sous vide. L'échange thermique est augmenté car il n'y a pas de double liaison et pas de perte dans la matière comme dans le tube à caloduc. Ce type de capteur peut être placé dans n'importe quelle position : la circulation du fluide (par la pompe) est assurée en série dans chacun des tubes avant de retourner au stockage.

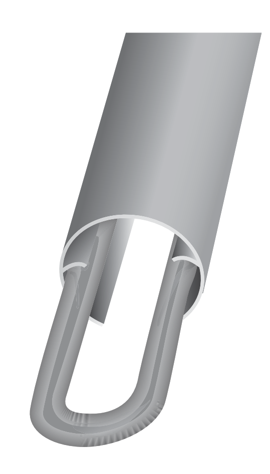


Figure 2.17
Constitution d'un capteur U-Pipe.

Capteurs plans autoconstruits

Le principe du capteur solaire est simple : capter l'énergie du soleil avec un matériau absorbant la lumière, dans lequel on fait circuler un liquide pour transporter ailleurs la chaleur ainsi produite. Le capteur solaire de base peut donc être fait avec un tuyau de jardin, le reste n'est qu'amélioration du rendement en vue d'une utilisation la plus quotidienne possible et dans des conditions d'éclairement les plus faibles.

Ces voies d'amélioration sont les suivantes.

- Passer du tuyau de jardin au tuyau Plymouth : il est noir et va donc absorber plus d'énergie.
- Avoir un absorbeur avec une bonne conduction de la chaleur : le Plymouth est remplacé par de l'acier (radiateurs), ou, mieux, par du cuivre.
- Augmenter l'absorption (et limiter les pertes par radiation) : peinture noire puis revêtements spéciaux (de type Tinox par exemple) déposés par voie électrochimique.
- Limiter les échanges de cet absorbeur avec quoi que ce soit d'autre que le liquide qui y circule : isolation arrière (avec un caisson) et pose à l'avant d'une vitre résistante à la grêle (et si possible pauvre en fer : le verre naturel contient du fer qui absorbe les rayons lumineux).

Panneaux autoconstruits ou industriels ?

Nous ne voulons pas décourager ceux d'entre vous qui voudraient construire leurs propres panneaux : ce sont des systèmes qui fonctionnent, du moins pour la production d'eau chaude. Il est malgré tout illusoire de vouloir atteindre les performances de panneaux industriels à des coûts qui leur seraient inférieurs (surtout acquis au travers de circuits associatifs). Le cuivre, les revêtements spéciaux et le vitrage trempé restent des matériaux coûteux.

Comparaison entre les capteurs plans et les capteurs à tubes

Que cela soit au travers de prospects, de clients, de journalistes ou de certains fabricants et revendeurs de capteurs à tubes, nous pouvons entendre les propos suivants.

« Mettre des capteurs à tubes sous vide, c'est utiliser les techniques d'aujourd'hui. Les courbes de rendement sont meilleures, c'est le jour et la nuit entre les capteurs plans et les capteurs à tubes. Les capteurs à tubes tiennent moins de place, sont plus esthétiques, et permettent de produire plus d'eau chaude, plus vite, plus longtemps. »

« Équipez-vous du top absolu : le capteur solaire à tubes sous vide de dernière génération. »

« Un des meilleurs capteurs du monde au prix d'un capteur plan. »

« Les capteurs n'ont pas pris en France, car on attendait un matériel plus efficace. C'est ce que sont les capteurs à tubes sous vide proposés aujourd'hui. »

« Heureusement que nous sommes là pour vous proposer des capteurs à tubes sous vide (parfois pas – trop – chers), sinon... »

On constate aujourd'hui une sorte d'engouement pour les capteurs à tubes. Mais il n'est pas directement lié à ce produit en lui-même : c'est simplement qu'il existe aujourd'hui une demande de capteurs solaires thermiques qui n'existait quasiment pas il y a quelque temps.

De plus en plus de gens souhaitent s'équiper et acheter « ce qui se fait de mieux », quitte à payer plus cher.

Nous allons présenter ici les principes de rendement des capteurs solaires afin que chacun puisse choisir (ou laisser choisir à l'installateur) en connaissance de cause les produits les mieux adaptés à son application. Il existe en effet de nombreuses configurations possibles pour l'installation et l'exploitation de capteurs solaires thermiques, et la meilleure solution n'est pas forcément la même d'une configuration à une autre.

Quelques considérations de géométrie

Nous allons ici nous intéresser à ce qui peut être déduit de simples constats géométriques. Nous procéderons ensuite à une étude comparative « complète » de deux capteurs plans et de deux capteurs à tubes.

L'éclairement solaire (en W/m^2) correspond à la puissance reçue par 1 m^2 de surface placée perpendiculairement au soleil. Comme cela a été évoqué au début de cette partie, lorsque le soleil n'est pas perpendiculaire, tout se passe comme si la surface « utile » du panneau diminuait d'un facteur égal au cosinus de l'angle d'incidence.

Avec un éclairage rasant, l'angle vaut 90° et la surface utile vaut S.cos(90°) = 0 : on ne capte rien. Mais, avec des tubes, on voit sur la figure 2.18 qu'autour de l'axe du tube, l'angle d'éclairage n'a pas d'importance (dans le détail, cela dépend en fait de la forme de l'absorbeur qui se trouve dans le tube – ce qui est exposé ici est une version « optimiste »). Attention toutefois : ce n'est vrai qu'autour de cet axe. La variation le long de l'axe du tube l'amène à subir la même perte d'énergie qu'un capteur plan.

Les tubes constituent donc une panacée ? Pas réellement, car, dans une installation normale, ils sont placés les uns à côté des autres et se font de l'ombre (figure 2.19). Donc, au-delà d'un certain angle (qui dépend du pas entre les tubes), la diminution de la surface utile se fait à nouveau sentir.

Les courbes de la figure 2.20 représentent cette variation de surface utile en

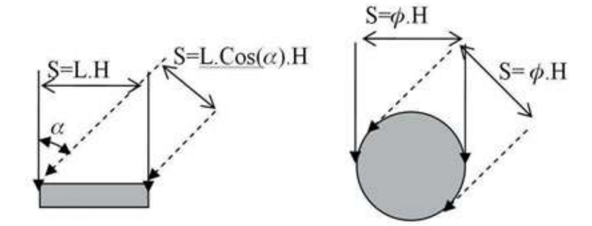


Figure 2.18
Comparaison de l'incidence des rayons lumineux : capteurs plan et à tubes.

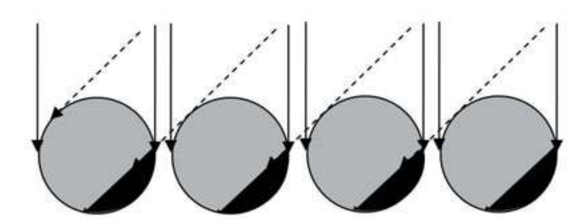


Figure 2.19
Ombres projetées par les tubes.

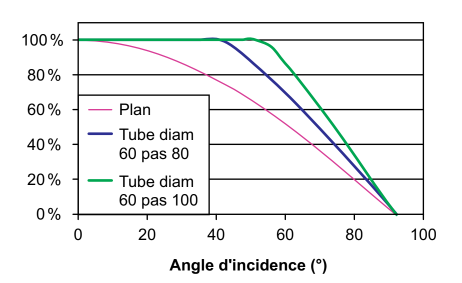


Figure 2.20
Variation de la surface utile avec l'incidence selon le type de capteur.

fonction de l'angle du soleil pour un capteur plan et deux capteurs à tubes ayant des pas différents. On le voit, avec le capteur à tubes au pas de 80, le gain de surface apparente moyenne entre 0 et 60° d'incidence est seulement de 15 %. Avec un pas de 100, le gain est de 20 % (soit 5 % de mieux), mais cela augmente également la surface totale occupée par le champ de capteurs de 25 % !

De plus, le soleil est surtout efficace à midi (heure solaire), car c'est à ce moment-là que l'épaisseur d'atmosphère traversée est la moins importante. Le matin et le soir, et plus particulièrement en plaine, les rayons solaires doivent traverser une importante couche de poussière et de pollution – ce qui cause une perte d'énergie.

Il convient donc de pondérer les courbes proposées ci-dessus par un facteur d'efficacité de l'éclairement. Pour des capteurs orientés plein sud, on obtient alors de nouvelles variations (figure 2.21) : les gains par rapport au capteur plan ne sont plus que de 12 et 16 %.

Pour obtenir un modèle complet de l'énergie absorbable par un capteur, il convient d'ajouter un dernier facteur : l'angle d'incidence ou IAM (*incidence angle modifier*). Pour un capteur plan, il exprime la variation du coefficient de réflexion de la lumière sur les capteurs en fonction de l'incidence ; il est généralement proche de 1. Pour un capteur à tubes sans réflecteur, ce coefficient exprime la variation de la surface apparente en fonction de la position du soleil.

Comme on le voit sur la figure 2.22, le capteur présente à midi des trous entre les tubes : une partie de l'énergie solaire est perdue. Le rendement est donc diminué d'un facteur égal au rapport du diamètre des tubes sur le pas entre les tubes. Lorsque le soleil tourne, le « trou » entre les tubes se réduit alors que, les tubes étant cylindriques, la surface d'absorption reste constante. L'énergie solaire perdue diminue donc, l'énergie captée reste la même, et le rendement global augmente par rapport à celui de 12 h. Au-delà d'une certaine limite (typiquement, inclinaison de 50°), les tubes se font de l'ombre. La surface efficace d'absorbeur, et donc le rendement, diminuent.

Selon l'autre axe (le long des tubes), il n'y a pas de « trou » : le comportement est sensiblement identique à celui d'un capteur plan.

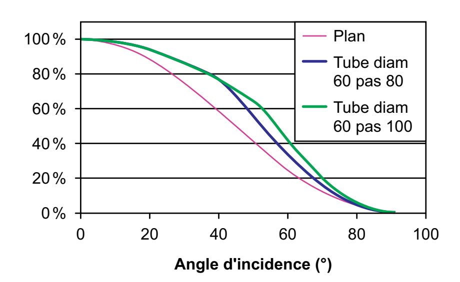


Figure 2.21
Variation de la surface utile selon le type de capteur (orientation plein sud).

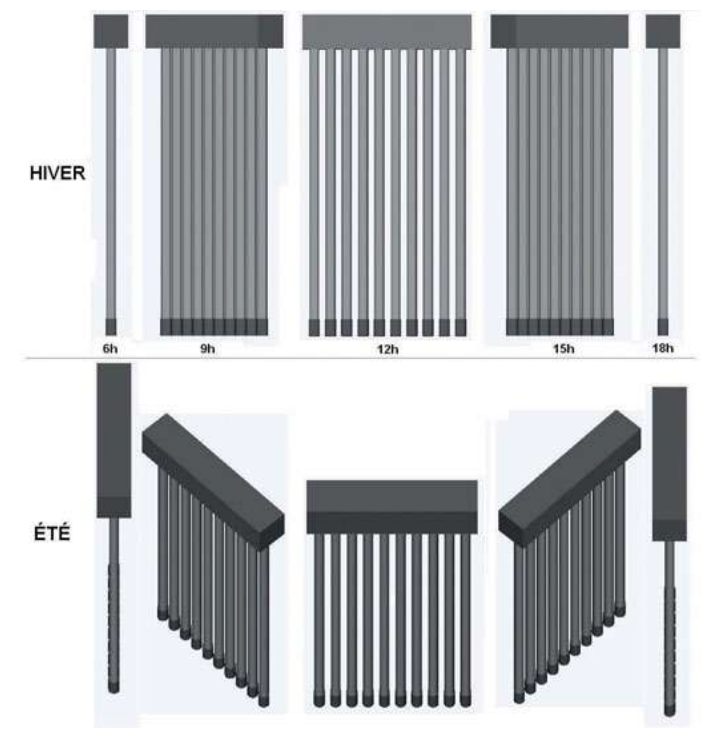


Figure 2.22
Aspects d'un même capteur à tubes vu du soleil pour différentes heures et saisons.

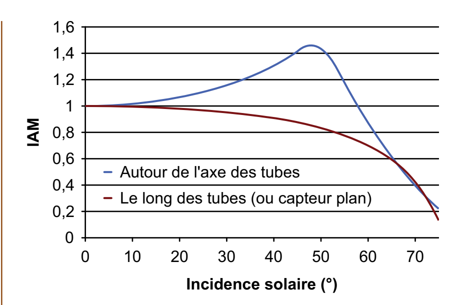


Figure 2.23
Facteurs d'angle pour un capteur à tubes (diamètre 58, pas 90) selon les deux axes.

Utilité d'un réflecteur arrière

Notons que la courbe des capteurs plans s'applique également pour un capteur à tubes équipé d'un réflecteur arrière : il n'y a pas d'augmentation de l'efficacité avec la modification de l'angle solaire autour de l'axe des tubes.

Les capteurs à tubes pensés pour fonctionner avec un réflecteur arrière présentent un pas très important entre les tubes, ce qui diminue le nombre de tubes par mètre carré, et donc les pertes. Toute la surface des réflecteurs est utile.

Généralement, ajouter un réflecteur à l'arrière de capteurs à tubes n'ayant pas été conçus avec cet élément n'apporte pas grand-chose puisque cela n'est efficace qu'autour de midi, le réflecteur étant ensuite rapidement à l'ombre.

À retenir

Ces calculs purement géométriques sont simplificateurs, mais ils montrent deux choses.

- Les capteurs à tubes ont des performances un peu plus stables que les capteurs plans si l'angle d'incidence varie autour de l'axe du tube.
- Dans une installation dite optimale (voir *L'orientation et l'inclinaison des capteurs, les masques*, p. 9), où les capteurs peuvent être placés face au sud et inclinés de façon optimale, le gain à attendre est finalement faible.

Il est important de comprendre que le gain ne se fait que dans un seul plan – or l'angle d'incidence varie dans le plan horizontal d'est en ouest chaque jour, et verticalement entre l'été et l'hiver.

Des tubes placés avec leur axe horizontal auront des performances lissées entre l'été et l'hiver, mais la variation de rendement en cours de journée sera la même que celle d'un capteur plan. Inversement, si l'axe des tubes est vertical, vous bénéficierez d'un lissage des performances en cours de journée, mais la variation entre été et hiver sera identique.

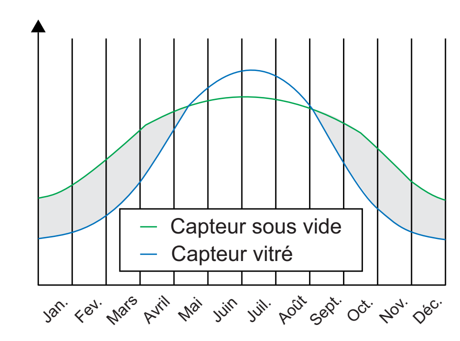


Figure 2.24
Courbes comparatives des capteurs entre été et hiver, utilisées comme argument commercial.

Les commerciaux en capteurs solaires présentent souvent un graphique illustrant la différence de comportement des capteurs entre été et hiver, qui favorise nettement le capteur sous vide par rapport au capteur vitré (figure 2.24). Mais cette courbe n'est obtenue que lorsque l'axe des tubes est horizontal (et il faut savoir que tous les capteurs à tubes ne supportent pas cette position). Il s'agit donc du capteur « idéal » pour un montage en façade, c'est-à-dire dans un plan vertical, orienté au sud. Sur une façade verticale plein est, on aura nécessairement un rendement inférieur.

Le choix entre capteur plan et à tubes doit donc, plutôt que se baser sur des arguments commerciaux, être adapté à votre situation propre. C'est ce que nous allons voir dans les pages qui suivent.

Quelques éléments de définition

L'absorbeur

Dans un capteur solaire thermique, l'absorbeur est la partie du capteur recevant la chaleur à exploiter. L'absorbeur perd sa chaleur en la transmettant :

- dans un liquide « caloporteur », dont le but est d'extraire des calories de l'absorbeur et de les transporter vers le lieu d'utilisation (c'est la partie utile) ;
- par rayonnement infrarouge (pertes) ;
- dans le milieu environnant, qui est généralement plus froid, par convection et conduction (pertes également).

Pour limiter ces pertes, le capteur est équipé de surfaces vitrées étanches (effet de serre) et d'isolant (laine de verre, de roche, mousse polyuréthane ou vide d'air), qui permettent de diminuer l'écart de température entre l'absorbeur et la température ambiante locale.

Le rayonnement

Le rayonnement est le mode de propagation de l'énergie thermique sous forme d'ondes infrarouges. C'est ce qui fait qu'un fer chauffé au rouge paraît chaud, et qu'il perd de la chaleur.

Plus un corps est chaud, plus le rayonnement qu'il émet est « blanc » : le soleil, dont la température est de l'ordre de 6 000 °C, produit une lumière blanche. En refroidissant, un fer très chaud passe du blanc au jaune, puis à l'orangé, et à 800 °C il est rouge. En refroidissant encore, il continue à émettre de la lumière, mais

celle-ci n'est plus visible par l'œil humain : cette lumière est dite infrarouge.

La convection

La convection est le mouvement d'un fluide, avec transport de chaleur, sous l'influence de différences de température.

Dans le capteur, il se produit des échanges de chaleur par convection naturelle entre l'absorbeur (chaud) et la surface vitrée (moins chaude), et entre les surfaces vitrées (un peu chaudes) et le milieu. Ces échanges sont augmentés en cas de vent.

L'air chaud montant au-dessus d'un convecteur électrique (qui porte bien son nom) est un phénomène de convection.

La conduction

La conduction est la transmission de proche en proche de la chaleur dans et par la matière.

Dans le capteur, il y a transmission de chaleur par conduction à travers l'isolant. C'est aussi ce qui fait que la face externe d'un radiateur est à la température du fluide qui circule à l'intérieur.

L'effet de serre

La couverture transparente (surface vitrée) permet un effet de serre : elle laisse passer le rayonnement solaire visible et réfléchit le rayonnement infrarouge émis par l'absorbeur, limitant ainsi les pertes puisque l'absorbeur peut capter à nouveau l'énergie perdue.

Les pertes

Dans notre cas, il s'agit de pertes de chaleur. Elles sont d'autant plus importantes que l'écart de température avec l'environnement est fort. Plus la différence de température entre l'absorbeur et l'air environnant est importante, moins bon sera le rendement du capteur.

L'irradiation solaire

L'irradiation solaire, calculée en watts par mètre carré, est la puissance que fournit le soleil à une surface de 1 m² placée perpendiculairement (voir chapitre *L'orientation et l'inclinaison des capteurs, les masques*, p. 9).

Efficacité des capteurs solaires

Nous allons nous baser sur un champ de capteurs nécessaire pour un chauffe-eau solaire ou un chauffage d'espace, la majeure partie des installations thermiques solaires se faisant pour ces applications.

Il existe deux méthodes pour évaluer les pertes et le rendement d'un capteur : une première, dite méthode française, et une plus récente, dite méthode européenne.

La méthode française est plus simple à comprendre, mais la méthode européenne fournit une évaluation plus précise des pertes d'un capteur. Le niveau de finesse de la méthode européenne est devenu nécessaire depuis l'apparition des capteurs à tubes. Nous présenterons ce procédé car les données fournies par les fabricants y font beaucoup référence. Cependant certains logiciels de calcul en ligne, comme ceux proposés par la société Tecsol (http://www.tecsol.fr), utilisent encore les paramètres de la méthode française (mais elle est en passe d'être remplacée prochainement par la méthode européenne).

Rendement d'un capteur par la méthode française

Dans la méthode française, la courbe de rendement d'un capteur est définie par l'équation suivante :

$n = B - (K \times (T_m - T_{ext})) / G$, où n est le rendement du capteur (en %), B le facteur optique du capteur (en %), K le coefficient de déperdition du capteur (en W/m².K), T_m la température moyenne du capteur (en °C)[1], T_{ext} la température extérieure (en °C), et G l'irradiation solaire (en W/m²).

Cette équation exprime simplement le fait que plus la différence de température du capteur avec l'extérieur est grande, plus le rendement est mauvais (car les pertes augmentent).

Si $DT = T_m - T_{ext}$, l'équation peut être réduite ainsi :

$n = B - (K \times DT) / G$.

Échelles de valeurs

▶ Le facteur optique

Le facteur optique (B) varie, suivant la nature du capteur, entre 0,5 et 0,8. Il correspond au rendement maximal du capteur (quand DT = 0).

Ce facteur B semble anodin mais sa définition prête déjà à interprétation d'un constructeur à l'autre. Il s'agit d'un rendement maximal soit, mais par rapport à quelle surface de capteur ? On peut ainsi se baser sur :

- la surface de captage proprement dite (ce qui donne le meilleur rendement) ;
- la surface de vitrage ;
- la surface hors tout des capteurs.

De notre point de vue, seule la dernière définition a un sens pratique, car une toiture est rarement extensible.

▶ Le coefficient K

Le coefficient K (exprimé en W/m².K) est représentatif des pertes thermiques du capteur. Il dépend essentiellement du niveau d'isolation du capteur et de la nature de l'absorbeur, et varie fortement en fonction du type de capteur :

- capteur sans vitre, 20 à 25 et plus ;
- capteur vitré simple, de 4 à 6 et plus ;

1 La température moyenne du capteur (T_m) est tout simplement la valeur moyenne des températures du fluide à l'entrée et à la sortie du capteur.

- capteur vitré sélectif, de 3 à 5 ;
- capteur sous vide à revêtement interne AL-N/AL, de 2 à 3 ;
- capteur sous vide à revêtement interne SS-C/CU, de 1 à 2.

> **En résumé**
>
> Un bon capteur a un grand facteur B (proche de 1) et un faible coefficient K (proche de 0).

Mise sur graphique

Supposons un capteur plan avec B = 0,70 et K = 4,5.

n = 0,7 – 4,5 (DT / G).

Nous avons supposé deux niveaux de rayonnement, l'inclinaison du capteur n'étant pas prise en compte. Le graphique de la figure 2.25 illustre le rendement selon la différence de température.

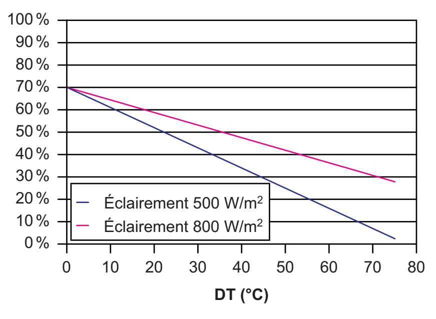


Figure 2.25
Rendement du capteur selon la différence de température pour deux éclairements reçus, méthode française.

On constate d'abord sur ce graphique que plus l'écart de température entre le fluide et l'extérieur est important, moins le rendement est bon, et cela quel que soit le rayonnement. C'est là un point extrêmement important, dont la compréhension est indispensable pour tirer le meilleur parti d'une installation solaire.

Prenons un exemple. On suppose que la température extérieure est de 10 °C, l'éclairement de 500 W/m², et que dans ces conditions le panneau chauffe l'eau de 10 °C (par ajustement du débit). Si on suppose que l'eau du chauffe-eau solaire est à 10 °C, la température moyenne dans le panneau est de 15 °C (soit DT = 5 °C), donc le rendement est de 65 % et la puissance captée de 327 W/m². Supposons maintenant que l'eau dans le chauffe-eau solaire est à 45 °C, la température moyenne dans le panneau de 50 °C (soit DT = 40 °C) : le rendement est de 47 %, et donc la puissance captée n'est plus que de 170 W/m², presque moitié moins !

Toute installation solaire devrait travailler avec une température d'entrée dans les capteurs qui soit la plus faible possible. En conséquence, on ne produira que de l'eau tiède, il faut donc privilégier les systèmes de chauffage basse température type planchers (ou murs) chauffants, qui tirent efficacement parti d'une eau tiède.

Le graphique de la figure 2.25 permet également de constater que le rendement du capteur n'est pas le même suivant l'intensité du rayonnement. Plus le rayonnement est faible, moins bon est le rendement.

L'équation $n = B - (K \times DT) / G$ peut se transformer en $n \times G = B \times G - K \times DT$, où $n \times G$ est l'énergie réellement captée, $B \times G$ celle qui aurait été captée par un capteur parfait (K = 0), et $K \times DT$ les pertes. Lorsque G diminue, les pertes restent constantes en valeur, et donc la proportion des pertes par rapport au captage augmente.

Calcul de la température maximale du capteur

Il est possible de déterminer sans le graphique la température maximale du capteur (c'est-à-dire la température pour laquelle le rendement est nul : l'énergie captée est entièrement absorbée par les pertes), grâce à une équation qui peut être écrite ainsi :

$0 = B - (K \times DT_{max}) / G$

$\Rightarrow B = K \times DT_{max} / G$

$\Rightarrow DT_{max} = B \times G / K.$

On considère en général que l'irradiation solaire utile varie entre 350 et 800 W/m². Dans notre cas, $DT_{max} = 0{,}7 \times 350 / 4{,}5 = 54$ °C par faible ensoleillement, et $DT_{max} = 0{,}7 \times 800 / 4{,}5 = 125$ °C par fort ensoleillement. Supposons une température ambiante de 35 °C : le capteur atteint son maximum à 125 + 35 = 160 °C durant les moments de fort ensoleillement, et à 90 °C lors de faible ensoleillement. Nous retiendrons donc 160 °C de température « à vide » pour ce capteur. Cette température maximale est celle que le capteur pourra atteindre en état de stagnation, c'est-à-dire avec la pompe de circulation éteinte et un ensoleillement fort. C'est le cas par exemple en plein été, alors que l'appoint de chauffage solaire est hors service et/ou que le préparateur d'eau chaude sanitaire a atteint sa température maximale de consigne.

Notons ici (nous y reviendrons p. 46) qu'en approchant de ces températures, les fluides solaires au monopropylène glycol présents dans le capteur commencent à connaître une modification chimique. Les fabricants (Tyfocor ou autre) recommandent d'ailleurs un remplacement régulier du fluide solaire (tous les trois ans).

À retenir

Nous l'avons déjà dit, mais nous n'insisterons jamais trop sur ce point : quelle que soit la température extérieure, un système solaire thermique doit travailler avec une température de fluide caloporteur la plus basse possible. Cela a des conséquences sur le type de chauffage « optimal »

mais aussi sur les capteurs eux-mêmes : une surface de capteurs trop importante donne un moins bon rendement (énergétique et financier) qu'une plus petite, puisqu'elle travaille avec une plus grande différence de température. De plus, faire fonctionner un système avec une température de fluide supérieure à 95 °C est non seulement inutile, mais également dangereux pour l'installation : les composants risquent d'être dégradés.

Mettre un maximum de capteurs s'avère inefficace et coûteux. Il est donc important de dimensionner son application de façon que les capteurs n'atteignent que très rarement l'état de stagnation (voir exemple en encadré).

Constat

Nous avons pu observer certaines applications conventionnelles en boucle fermée pressurisée fonctionnant avec un fluide solaire au monopropylène glycol qui n'avait jamais été remplacé dix ans après l'installation. Cela concernait notamment une application composée de deux capteurs de 2 m² et d'un ballon de 200 l, qui fonctionne avec les deux capteurs en hiver et avec un seul capteur en été. L'usager couvre 50 % de son champ de capteurs au printemps et le découvre à l'automne.

Par ailleurs, les courbes de rendement présentent souvent des performances avec un écart entre la température ambiante et celle du capteur supérieur à 60 °C, ce qui n'a pas d'intérêt pratique : comme nous l'avons vu, le rendement de l'installation est alors très mauvais (15 à 30 % selon les courbes), et il devient donc très improbable d'atteindre ces 60 °C d'écart. Si l'écart de température dépasse 80 °C, il y a un problème technique ou de conception de l'installation. Ainsi, la fin des courbes de la figure 2.25 n'informe que sur la température maximale de stagnation du capteur, et non sur ses performances en état de travail.

Rendement d'un capteur par la méthode européenne

Les données et formules de base sont données dans la norme EN 12975-2, partie 6.14.85.5. La courbe de rendement d'un capteur est définie par l'équation suivante :

$$n = n_0 - a_1 \times ((T_m - T_{ext}) / G) - a_2 \times G \times ((T_m - T_{ext}) / G)^2,$$

où n est le rendement du capteur, n_0 le coefficient de conversion optique du capteur (en %), a_1 le coefficient de déperditions thermiques par conduction du capteur (en W/m².K), a_2 le coefficient de déperditions thermiques par convection du capteur (en W/m².K²), T_m la température moyenne du capteur (en °C), T_{ext} la température extérieure (en °C) et G l'irradiation solaire (en W/m²).

Si $DT = T_m - T_{ext}$, l'équation peut être réduite ainsi :

$$n = n_0 - a_1 \times (DT / G) - a_2 \times G \times (DT / G)^2.$$

Le modèle européen est quasiment identique au modèle français. Il ajoute simplement un raffinement du terme concernant les pertes. Dans un domaine normal d'utilisation (DT < 50 °C), ce second terme a une influence en général négligeable pour les capteurs plans (puisque a_1 est important). Il n'en va pas de même pour les capteurs à tubes pour lesquels a_1 est faible : le second terme est d'un ordre de grandeur comparable.

Échelles de valeurs

▶ Le facteur optique n_0

Le facteur optique (n_0) varie suivant la nature du capteur : il est calculé en fonction de sa surface d'ouverture. Concrètement, il s'agit généralement de la surface réellement utile du capteur, celle susceptible d'absorber l'énergie solaire. Pour un capteur plan, cette surface utile correspond à la surface totale moins les surfaces liées aux isolants des bords et les cornières. Pour un capteur à tubes sous vide, c'est la surface réellement exposée des tubes (les espaces entre les tubes sont à prendre en compte). Ce facteur optique varie entre 0,5 et 0,8. Il correspond au rendement maximal du capteur (quand DT = 0).

▶ Le coefficient a_1

Exprimé en W/m².K, le coefficient a_1 est représentatif des pertes thermiques par conduction du capteur. Il dépend essentiellement du niveau d'isolation du capteur et de la nature de l'absorbeur, et varie fortement en fonction du type de capteur :

- capteur sans vitre, 20 à 25 et plus ;
- capteur vitré simple, de 4 à 6 et plus ;
- capteur vitré sélectif, de 3 à 5 ;
- capteur sous vide à revêtement interne AL-N/AL, de 2 à 3 ;
- capteur sous vide à revêtement interne SS-C/CU, de 1 à 2.

▶ Le coefficient a_2

Exprimé en W/m².K², le coefficient a_2 est représentatif des pertes thermiques par convection du capteur. Il dépend essentiellement de la qualité de l'absorbeur du capteur et de sa nature, et varie fortement en fonction du type de capteur :

- capteur vitré simple, de 0,05 à 0,1 et plus ;
- capteur vitré sélectif, de 0,005 à 0,015 ;
- capteur sous vide à revêtement interne AL-N/AL, de 0,006 à 0,010 ;
- capteur sous vide à revêtement interne SS-C/CU, de 0,004 à 0,007.

Mise sur graphique

Supposons un capteur plan avec K = 0,70, a_1 = 3,5 et a_2 = 0,02 :

$$n = 0{,}7 - 3{,}5 \times (DT / G) - 0{,}02 \times G \times (DT / G)^2.$$

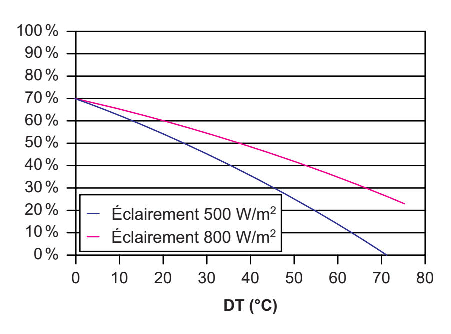


Figure 2.26
Rendement du capteur selon la différence de température, méthode européenne.

Nous avons supposé deux niveaux de rayonnement, l'inclinaison du capteur n'étant pas prise en compte. Les mêmes conclusions peuvent être tirées du graphique obtenu (figure 2.26) que du précédent. Une remarque cependant : les lignes obtenues sont légèrement courbes, alors que les précédentes étaient des droites.

Passage d'une méthode à l'autre

Il est difficile de passer des données françaises aux données européennes puisque a_2 est inconnu. En revanche, il est toujours possible de passer des données européennes aux données françaises en remplaçant de façon approximative la parabole européenne par une droite.

Pour retrouver la formule de la méthode française, il suffit de considérer que n_0 = B (corrigé du rapport de la surface utile sur la surface totale), et K = $a_1 + 2 \times a_2 \times DT / 2$ où DT est la plage utile de température considérée.

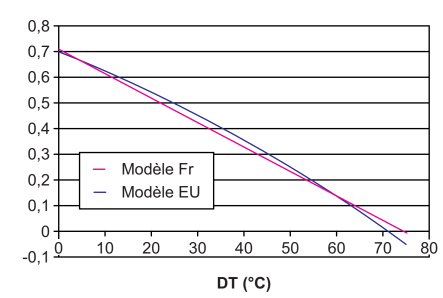


Figure 2.27
Superposition des courbes de rendement des méthodes européenne et française.

Autres façons d'utiliser les courbes de rendement

Une autre façon d'aborder les courbes de rendement est d'inverser les deux axes, ce qui permet d'introduire la notion de température maximale « pratique ».

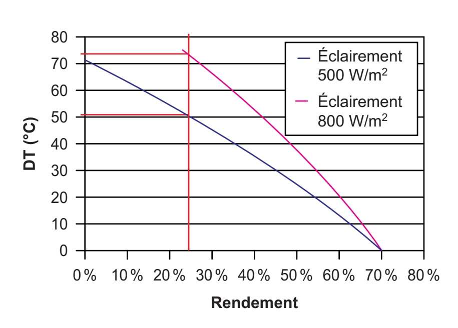


Figure 2.28
Évolution du rendement.

Dans la courbe de la figure 2.28, nous avons matérialisé une limite basse de rendement à 25 % – ce pourcentage pouvant être considéré comme une limite pratique d'utilité de capteurs solaires.

On voit alors qu'avec un éclairement de 500 W/m², quoi qu'il se passe, on ne pourra pas chauffer de l'eau à plus de 50 °C au-dessus de la température extérieure (70 °C pour 800 W/m²).

Un capteur solaire ne chauffe pas de l'eau quelle que soit la température de celle-ci. Il est seulement capable de l'amener au-dessus de la température extérieure, et ce dans une certaine limite.

En hiver, si vous injectez de l'eau à 90 °C dans un panneau solaire, elle a toutes les chances d'en ressortir plus froide !

Cette notion de maximale « pratique » est encore mieux mise en valeur dans la courbe de la figure 2.29.

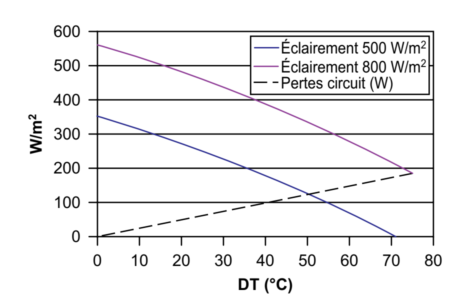


Figure 2.29
Évolution de la puissance utile captée.

Cette courbe est obtenue en multipliant les rendements par les éclairements et en ajoutant une courbe de pertes thermiques dans le circuit. Les points d'intersection de cette courbe avec les deux précédentes définissent les températures limites que va pouvoir atteindre le système.

Définition d'un capteur idéal

Un capteur idéal aurait des caractéristiques correspondant à B = 1 et K = 0 suivant la méthode française, et à $n_0 = 1$, $a_1 = 0$ et $a_2 = 0$ suivant la méthode européenne. Mais ceci n'est pas réalisable, car les capteurs ne peuvent être parfaits, par construction.

Nous allons donc devoir définir ce capteur idéal autrement. Ce sera le capteur le plus stable possible (ses pertes n'augmentent pas significativement suivant la différence de température), même si le rendement initial n'est pas excellent.

Prenons deux capteurs ayant des caractéristiques radicalement différentes (tableau ci-dessous). Nous obtenons deux courbes de rendement différentes (figure 2.30). Dans les faits, nous pouvons considérer le capteur Alpha comme étant un capteur plan, et le capteur Bêta comme étant un capteur à tubes sous vide. On pourrait même préciser : un mauvais capteur plan et un très bon capteur à tubes.

Deux types de capteurs différents

Modèle	n_0	a_1	a_2
Alpha	0,95	6	0,05
Bêta	0,70	0,5	0,005

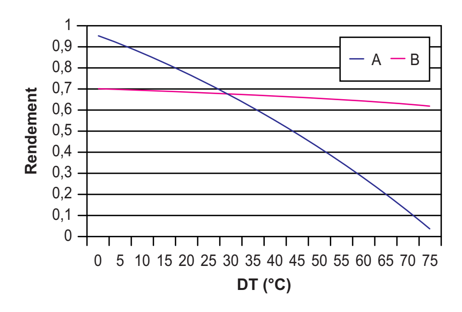


Figure 2.30
Comparaison des rendements de deux capteurs différents avec G = 800 W/m².

Le capteur Alpha a un rendement initial proche de 1. Mais, avec des pertes importantes, le rendement chute vite et, quand la différence de température dépasse 30 K, ce capteur devient moins efficace que le capteur Bêta.

Le capteur Bêta a lui un rendement initial peu performant. Cependant, ses coefficients de pertes sont plus avantageux : il permet un fonctionnement beaucoup plus stable quelle que soit la différence de température. Sur la plage de différences de température observées, le capteur Bêta ne voit sa courbe de rendement chuter que de 10 %, alors que celle de l'Alpha chute de près de 90 %.

Avec les capteurs Bêta, la surface du champ de capteurs est plus importante, mais le rendement reste globalement le même quelle que soit la saison : on parle donc de capteur « stable ». En revanche, avec les capteurs Alpha, la surface du champ de capteurs est moins importante mais son rendement est presque nul lorsque le système est soumis à une différence de température supérieure à 70 K.

On pourrait conclure que le capteur Alpha est moins bon que le capteur Bêta, mais ce n'est pas aussi simple : il faut tenir compte du climat.

Dans les régions tempérées et chaudes, il est préférable de choisir un capteur de type Alpha car plus la différence de température est importante, moins il est nécessaire de chauffer l'eau. De plus, il est rare d'avoir des différences de température supérieures à 30 K. En revanche, dans les régions froides, en altitude, il est préférable de choisir un capteur de type Bêta, car il n'est pas rare de chauffer de l'eau avec une température extérieure négative – et donc une différence de température importante.

Calcul du rendement

Selon que l'on parle de surface hors tout (surface du cadre), de surface d'entrée (surface vitrée) ou de surface d'absorbeur, les rendements ne sont évidemment pas les mêmes. Pour comparer deux capteurs, il est donc très important de vérifier que les caractéristiques fournies sont bien relatives à la même surface.

Pour passer d'un coefficient exprimé pour une surface à un autre coefficient, il suffit de le multiplier par le rapport des surfaces :

$n_{horstout} = n_{abs} \times S_{horstout} / S_{abs}$, $a_{1horstout} = a_{1abs} \times S_{horstout} / S_{abs}$ et $a_{2horstout} = a_{2abs} \times S_{horstout} / S_{abs}$.

Cas concret : comparaison de quatre capteurs

L'étude de quatre capteurs types va nous permettre de mettre en pratique les principes que nous venons d'exposer. Le tableau présenté ci-dessous synthétise les caractéristiques principales de ces capteurs ; ces données sont inspirées de celles de capteurs parmi les plus courants du commerce.

Caractéristiques de quatre capteurs types

Capteur	n_0 [2]	a_1	a_2	Type	Coût/m² (TTC, en €)
A	0,418	0,87	0,0094	Tubes	143
B	0,777	3,08	0,0095	Plan	404
C	0,313	1,14	0,0050	Tubes	128
D	0,703	3,43	0,0100	Plan	144

2 En surface brute, qui nous semble être la seule mesure ne prêtant pas à interprétation, obtenue par règle de trois avec la surface d'absorbeur et la surface totale.

Il est également tenu compte du facteur d'angle dans les calculs qui suivent.

Pour cette étude, nous avons installé nos capteurs à Toulouse, face au sud et inclinés à 70° par rapport à l'horizontale. L'éclairement du lieu en fonction du mois est obtenu en utilisant les données du site http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/ (rechercher « interactive maps » puis « solar irradiance data »).

Première évaluation : rendement des capteurs avec DT = 30 °C

Pour cette première hypothèse, on établit a priori pour toute l'année un DT de 30 °C. Nous allons relever les puissances produites avec les différents capteurs au cours d'une journée de décembre puis de juin, par ciel moyen et par ciel clair.

En décembre (ciel moyen)

Commençons par le mois le plus mauvais pour l'écologiste solaire : les courbes de la figure 2.31 sont obtenues pour l'éclairement moyen en décembre (en tenant compte des jours de pluie).

Le tableau ci-dessous exprime les résultats obtenus en fin de journée.

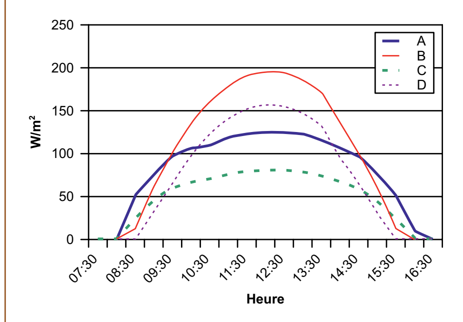


Figure 2.31
Puissance produite le 21 décembre pour DT = 30 °C (ciel moyen).

Résultats obtenus en fin de journée (21 décembre, ciel moyen)

Capteur	Total journalier (Wh/m²) le 21 décembre (pour DT = 30 °C et ciel moyen)
A	818
B	950
C	505
D	695

On peut faire plusieurs remarques, qui rejoignent les constats établis plus haut.

- Les capteurs à tubes démarrent plus tôt le matin et s'arrêtent plus tard : ils sont moins sensibles à l'angle solaire que les capteurs plans.
- L'effet pratique d'une longue durée de fonctionnement est à pondérer par le fait qu'il y a peu de flux solaire le matin et le soir
- Les deux capteurs plans fonctionnent avec une plus grande efficacité à midi que les capteurs à tubes. À ce moment-là, les capteurs à tubes présentent, comme nous l'avons vu plus haut, une plus petite surface d'absorption que dans le reste de la journée.

En décembre (ciel clair)

Passons maintenant à une belle journée du même mois (ciel clair), au cours de laquelle l'éclairement disponible à midi passe de 400 à 800 W/m².

On peut noter plusieurs choses dans ce deuxième cas de figure.

- La durée de fonctionnement plus longue des capteurs à tubes devient négligeable.
- Les deux capteurs plans passent relativement largement devant les deux capteurs à tubes en production journalière.
- Alors que l'éclairement n'a varié que d'un facteur 2,5, les capteurs plans ont vu leur production multipliée par 4 et les capteurs à tubes par 3.

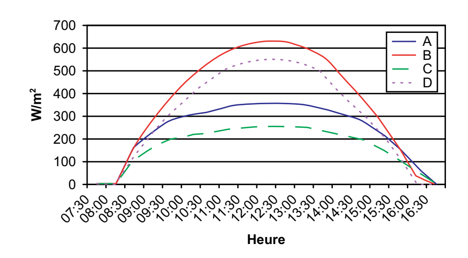


Figure 2.32
Puissance produite le 21 décembre pour DT = 30 °C (ciel clair).

Résultats obtenus en fin de journée (21 décembre, ciel clair)

Capteur	Total journalier (Wh/m²) le 21 décembre (pour DT = 30 °C et ciel clair)
A	2 427
B	3 434
C	1 707
D	2 885

Ce dernier point amène une remarque importante : la notion d'éclairement moyen mensuel donne des résultats pessimistes puisqu'une seule belle journée fournit beaucoup plus d'énergie que deux journées moyennes. Pour un panneau solaire, il faut que l'éclairement franchisse un certain seuil (égal aux pertes) avant de devenir rentable. Pour des panneaux photovoltaïques, chaque photon est converti en électricité, avec un certain rendement, mais sans perte : l'énergie captée est directement proportionnelle à l'énergie reçue.

Tous les capteurs produisent plus par ciel clair. Cela est intéressant en hiver, puisque ces journées-là correspondent à celles où il fait le plus froid.

En juin (ciel moyen)

Passons maintenant aux beaux mois d'été, avec un ciel moyen. On peut tirer les enseignements suivants.

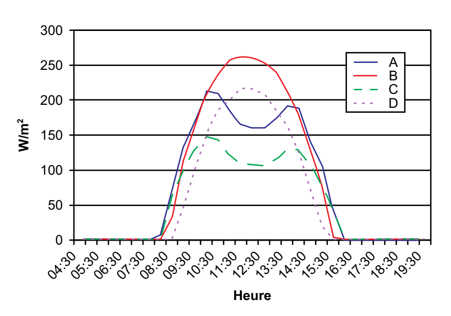


Figure 2.33
Puissance produite le 21 juin pour DT = 30 °C (ciel moyen).

Résultats obtenus en fin de journée (21 juin, ciel moyen)

Capteur	Total journalier (Wh/m²) le 21 juin (pour DT = 30 °C et ciel moyen)
A	1 248
B	1 324
C	880
D	948

- La production d'énergie supplémentaire induite par une durée de fonctionnement plus longue des capteurs à tubes est, ici aussi, négligeable.
- Les deux capteurs plans produisent plus ou autant d'énergie que les deux capteurs à tubes.
- Du fait de l'inclinaison des capteurs, la production n'est que légèrement supérieure à celle du mois de décembre – nous reviendrons sur ce point plus loin.

En juin (ciel clair)

Les mêmes conclusions s'appliquent par temps clair.

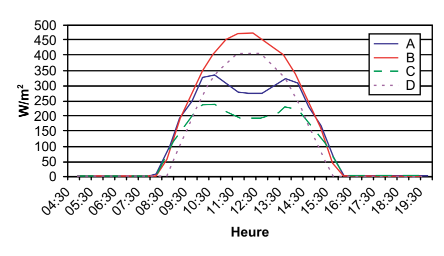


Figure 2.34
Puissance produite le 21 juin pour DT = 30 °C (ciel clair).

Résultats obtenus en fin de journée (21 juin, ciel clair)

Capteur	Total journalier (Wh/m²) le 21 juin (pour DT = 30 °C et ciel clair)
A	2 016
B	2 381
C	1 469
D	1 829

Rendement annuel

Examinons maintenant l'ensemble de la production annuelle, avec une hypothèse de ciel moyen (figure 2.35) et de ciel clair (figure 2.36).

Comme nous l'avons vu, le résultat final sera situé quelque part entre les deux jeux de courbes.

La principale remarque que nous pouvons faire est que l'inclinaison importante des

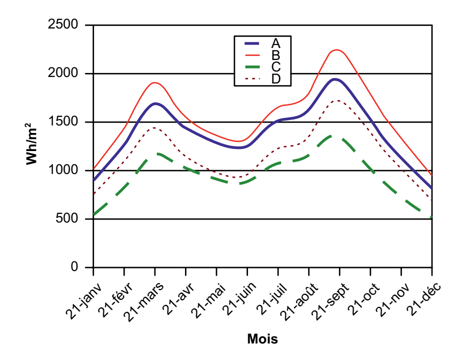


Figure 2.35
Puissance produite annuellement pour DT = 30 °C (ciel moyen).

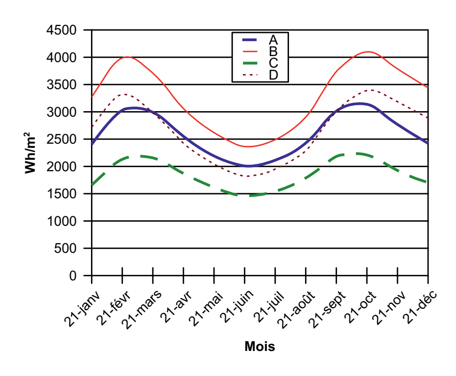


Figure 2.36
Puissance produite annuellement pour DT = 30 °C (ciel clair).

capteurs favorise la production hivernale et limite la surproduction estivale quel que soit le type de capteur. On obtient également une production maximale à l'intersaison, ce qui est très intéressant.

Autre point : l'amplitude de variation de production d'énergie en fonction de la saison est plus faible pour les capteurs à tubes. En revenant sur les courbes précédentes, on constate que cette remarque s'applique également à l'amplitude journalière : la production d'énergie est plus constante dans la journée avec des capteurs à tubes.

Pour le tableau de synthèse proposé ci-après, nous avons fait l'hypothèse

que la production réelle était égale à la moyenne des courbes obtenues par ciel clair et par ciel moyen (cela ne change pas les conclusions).

Tableau de synthèse

Capteur	Production journalière moyenne (en kWh/m²)	Coût (en €/m²)	Coût du kWh/m² (en €)
A	2,0	143	72
B	2,4	404	168
C	1,4	128	92
D	1,9	114	60

Nous pouvons tirer trois conclusions de ces analyses.

- Le meilleur capteur est un capteur plan, mais son prix très élevé n'est pas justifié par ses performances.
- Malgré le discours couramment entendu, il existe donc bien des capteurs à tubes moins performants que des capteurs plans (en termes de production, mais aussi de coût de revient).
- Une inclinaison importante permet effectivement de limiter la surchauffe.

Deuxième évaluation : rendement des capteurs dans différents montages

Pour compléter ces analyses et introduire ce qui sera vu dans le chapitre *Stocker la chaleur* (voir p. 50), nous avons réalisé une simulation de la production de ces quatre capteurs dans trois montages différents :

- une production d'eau chaude sanitaire avec un volume d'eau de 30 l par mètre carré de capteur et une température matinale de 5 °C en hiver et de 20 °C en été[3] ;
- un système de chauffage basse température avec un stock de 100 l par mètre carré de capteur et une température matinale de 29 °C ;
- un système de plancher solaire direct (PSD) avec 1 m³ de béton par mètre carré (équivalent à 500 l d'eau) et une température matinale de 25 °C.

Cette simulation permet d'affiner l'hypothèse fixée auparavant, DT = 30 °C, puisque ce paramètre change suivant l'heure de la journée (les stocks se réchauffant) et suivant l'application (l'eau n'est jamais à 5 °C dans un plancher solaire direct). Nous allons voir ainsi que l'hypothèse adoptée pour la différence de température était pessimiste.

En décembre (ciel moyen)

Comme nous l'avons vu, plus l'eau utilisée est froide, plus la production est importante. Dans ces conditions, on constate cependant qu'aucune des applications ne produit suffisamment d'énergie pour être autonome en eau chaude sanitaire avec l'un ou l'autre des capteurs. On remarque également que la production est dans les trois cas supérieure ou égale à celle de l'hypothèse adoptée précédemment, avec DT = 30 °C.

En décembre (ciel clair)

En décembre, par ciel clair, trois des capteurs rendent le système autonome. Par rapport aux applications de type chauffage, celle de type eau chaude sanitaire est moins performante. Elle a pourtant l'eau la plus froide au départ, mais ce n'est plus du tout vrai en fin de journée : en moyenne, sur la journée, ce n'est pas l'application pour laquelle l'eau est la plus froide, donc le rendement chute. Pour les

Puissance produite le 21 décembre (ciel moyen, température extérieure de 6 °C)

	Eau chaude sanitaire		Stock basse température		Plancher solaire direct	
	Volume 30 l Température initiale 5 °C		Volume 100 l Température initiale 29 °C		Volume 500 l Température initiale 25 °C	
Capteur	Température atteinte	Wh captés	Température atteinte	Wh captés	Température atteinte	Wh captés
A	32	922	36	768	26	848
B	41	1 166	37	897	27	1 130
C	25	673	33	475	26	547
D	36	1 001	35	652	27	878

3 Le volume par mètre carré est volontairement un peu faible, il correspond plutôt à une installation mixte eau chaude sanitaire + chauffage.

Puissance produite le 21 décembre (ciel clair, température extérieure de 6 °C)

	Eau chaude sanitaire		Stock basse température		Plancher solaire direct	
	Volume 30 l Température initiale 5 °C		Volume 100 l Température initiale 29 °C		Volume 500 l Température initiale 25 °C	
Capteur	Température atteinte	Wh captés	Température atteinte	Wh captés	Température atteinte	Wh captés
A	68	2 152	48	2 173	29	2 320
B	90	2 680	56	3 065	31	3 567
C	52	1 598	42	1 518	28	1 636
D	79	2 305	52	2 559	30	3 044

Puissance produite le 21 juin (ciel moyen, température extérieure de 20 °C)

	Eau chaude sanitaire		Stock basse température		Plancher solaire direct	
	Volume 30 l Température initiale 20 °C		Volume 100 l Température initiale 29 °C		Volume 500 l Température initiale 25 °C	
Capteur	Température atteinte	Wh captés	Température atteinte	Wh captés	Température atteinte	Wh captés
A	56	1 049	40	1 026	27	1 082
B	63	1 385	43	1 375	28	1 557
C	48	798	37	752	27	812
D	55	1 168	40	1 109	28	1 291

Puissance produite le 21 juin (ciel clair, température extérieure de 20 °C)

	Eau chaude sanitaire		Stock basse température		Plancher solaire direct	
	Volume 30 l Température initiale 20 °C		Volume 100 l Température initiale 29 °C		Volume 500 l Température initiale 25 °C	
Capteur	Température atteinte	Wh captés	Température atteinte	Wh captés	Température atteinte	Wh captés
A	72	1 602	53	2 372	30	2 448
B	83	2 104	61	3 344	32	3 616
C	60	1 224	47	1 793	29	1 866
D	72	1 776	55	2 787	31	3 043

deux autres applications, l'énergie captée est sensiblement celle de l'hypothèse précédente (DT = 30 °C).

En été (ciel moyen)

En été, avec un ciel moyen, trois capteurs permettent d'obtenir une eau chaude sanitaire utilisable directement. Nous n'interpréterons pas les résultats des applications type chauffage, qui n'ont pas d'intérêt en été – notons néanmoins que ce sont celles qui captent le plus d'énergie, puisque ce sont les plus froides.

En été (ciel clair)

Dans le cas d'une belle journée estivale, tous les panneaux fournissent une eau chaude sanitaire directement utilisable. Trois sont au-delà du raisonnable.

Panneaux inclinés à 15°

Les résultats présentés jusqu'ici sont ceux de capteurs placés face au sud et inclinés à 70° par rapport à l'horizontale. Nous allons analyser à présent le rendement de ces mêmes capteurs inclinés à 15° (angle des toits dans le sud de la France).

Les courbes des figures 2.37 et 2.38 indiquent clairement que la production est plus importante en été qu'en hiver. Une inclinaison des panneaux à 15° est donc surtout adaptée à une production d'eau chaude sanitaire saisonnière.

On note également que le ratio de production été/hiver est sensiblement le même entre les capteurs plans et à tubes.

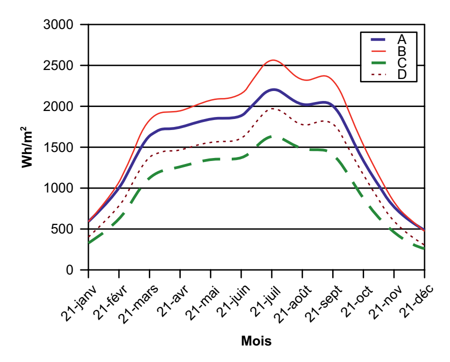


Figure 2.37
Puissance produite en un jour pour DT = 30 °C, panneaux inclinés à 15°, ciel moyen.

Les résultats obtenus (voir les deux tableaux ci-dessous et en page suivante) montrent qu'en hiver la production a chuté de 30 % par rapport à celle des capteurs inclinés à 70°, ce qui conduirait naturellement à augmenter la surface. Mais en juin, l'eau bout dans l'application eau chaude sanitaire.

Les résultats sont manifestes : une inclinaison des capteurs à 15° n'est pas la solution optimale. Le ratio de production été/hiver, qui est proche de 1 pour les panneaux à 70°, passe ici à 4 !

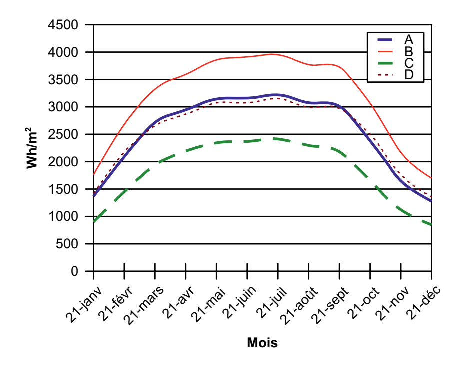


Figure 2.38
Puissance produite en un jour pour DT = 30 °C, panneaux inclinés à 15°, ciel clair.

> **Remarque**
>
> Dans la plupart des cas présentés ici, les capteurs plans fournissent une eau plus chaude en fin de journée que les capteurs à tubes. Ces derniers sont pourtant censés mieux fonctionner avec des différences de température importantes, mais dans les faits, ils fournissent une puissance insuffisante.

Puissance produite le 21 décembre (ciel clair, température extérieure de 6 °C, panneaux inclinés à 15°)

	Eau chaude sanitaire		Stock basse température		Plancher solaire direct	
	Volume 30 l Température initiale 5 °C		Volume 100 l Température initiale 29 °C		Volume 500 l Température initiale 25 °C	
Capteur	Température atteinte	Wh captés	Température atteinte	Wh captés	Température atteinte	Wh captés
A	42	1 281	34	636	26	698
B	56	1 624	35	707	27	885
C	32	940	31	382	26	436
D	50	1 395	33	490	26	660

Puissance produite le 21 juin (ciel clair, température extérieure de 20 °C, panneaux inclinés à 15°)

	Eau chaude sanitaire		Stock basse température		Plancher solaire direct	
	Volume 30 l Température initiale 20 °C		Volume 100 l Température initiale 29 °C		Volume 500 l Température initiale 25 °C	
Capteur	Température atteinte	Wh captés	Température atteinte	Wh captés	Température atteinte	Wh captés
A	97	2 301	53	2 372	30	2 448
B	111	3 009	61	3 344	32	3 616
C	81	1 769	47	1 793	29	1 866
D	96	2 541	55	2 787	31	3 043

Troisième évaluation : capteurs à tubes horizontaux ou verticaux

Une dernière question concerne l'orientation des tubes : horizontaux ou verticaux ? Comme nous l'avons vu, une orientation horizontale des tubes[4] (parallèle à l'arête du toit) devrait permettre une meilleure uniformité de la production non plus durant la journée, mais au cours des saisons. Nous allons donc comparer la production annuelle de capteurs plans, à tubes horizontaux et à tubes verticaux.

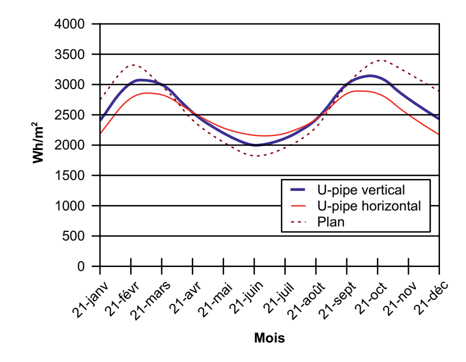


Figure 2.39
Puissance journalière produite pour DT = 30 °C, panneaux inclinés à 70°, ciel clair.

Panneaux inclinés à 70°

Les courbes des figures 2.39 et 2.40 permettent de voir les résultats que l'on obtient lorsque les capteurs sont inclinés à 70°.

La production moyenne annuelle n'est pas sensiblement différente pour les trois configurations. On peut donc dessiner de manière significative une seule courbe représentant une valeur moyenne (figure 2.40).

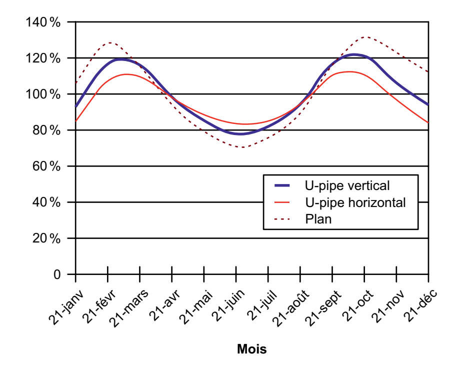


Figure 2.40
Évolution annuelle de la puissance journalière ramenée à sa valeur moyenne pour DT = 30 °C, panneaux inclinés à 70°, ciel clair.

Cette courbe révèle deux points :

- pour du chauffage, le panneau plan fournit le rapport été/hiver le plus intéressant ;
- les tubes horizontaux présentent effectivement la courbe la plus plate. Il s'agit donc d'une configuration intéressante pour de l'eau chaude sanitaire.

Panneaux inclinés à 15°

Lorsque les panneaux sont inclinés à 15°, les conclusions sont encore plus tranchées (voir figure 2.41). Avec ce type d'inclinaison, aucune des solutions n'est adaptée pour fournir un appoint au chauffage. Les capteurs à tubes horizontaux présentent le rapport été/hiver le plus intéressant en termes de stabilité de production.

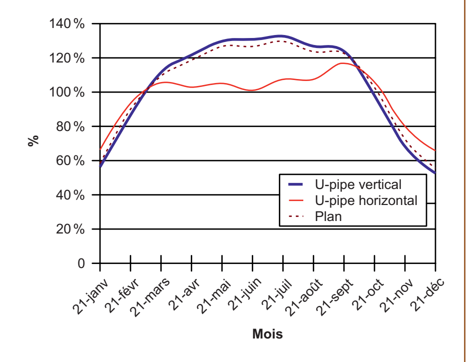


Figure 2.41
Évolution annuelle de la puissance journalière ramenée à sa valeur moyenne pour DT = 30 °C, panneaux inclinés à 15°, ciel clair.

4 Rappelons que tous les capteurs à tubes ne sont pas compatibles avec une installation dans laquelle l'axe des tubes est horizontal.

À retenir

Les études que nous venons de présenter permettent de tirer une première conclusion : on ne peut faire de généralisation. Un capteur à tubes sous vide n'aura pas forcément de meilleures performances qu'un capteur plan, contrairement au discours souvent entendu.

D'une façon générale, il est préférable d'installer un capteur avec un rendement médiocre au mètre carré, mais présentant des performances stables sur un toit plat (pente inférieure à 30 %) : même s'il est surdimensionné pour être utile en hiver, le capteur ne surchauffera pas excessivement en été.

Au-delà des critères objectifs de performance et de prix, d'autres aspects doivent être pris en compte : rapidité de montage, évolutivité, disponibilité, etc. L'arrivée des capteurs à tubes sous vide a permis d'élargir l'offre solaire, de diversifier les solutions, mais ils ne constituent en aucun cas une panacée. L'énergie grise[5] des capteurs à tube, du fait de leur complexité, est plus importante que pour des capteurs plans. Et la maintenance de ces derniers est facile. Ces données peuvent également devenir des critères de choix.

Pour des installations solaires, le capteur n'est en outre qu'une partie (essentielle certes) du système. D'autres éléments doivent être analysés : choix du ballon, autovidange, basse température, flexibles inox ou plastiques, etc. L'important est que le capteur satisfasse aux exigences de l'ensemble du système.

Enfin, la manutention est aussi un critère de choix qu'il ne faut pas oublier : quels sont le poids et l'encombrement du panneau individuel ? Faudra-t-il louer une grue pour le placer sur le toit ? Les capteurs à tubes sont plus pratiques (excepté avec la technologie U-Pipe) que les capteurs plans, car les tubes sont posés au dernier moment. Parfois deux panneaux plans de 1 m² sont préférables à un seul de 2 m².

Ainsi, pour une exposition sud ou approchée, sans une recherche de la performance à tout prix, il faut choisir les capteurs les mieux adaptés aux besoins de chacun en termes de performance, de prix, mais aussi, comme nous venons de le voir, en prenant en compte tous les « à-côtés ». D'ailleurs, la question principale n'est pas le type de capteur, mais son dimensionnement.

Pour une exposition plus difficile, nous recommandons de faire appel à un bureau d'études, qui sera capable de produire une évaluation des performances avec garantie de résultat. Si l'installation est jugée viable, on peut alors choisir les équipements les mieux adaptés à l'usage prévu.

5 Énergie nécessaire à la fabrication, à l'utilisation et au recyclage du produit.

Transporter la chaleur

Ce chapitre présente le transport des calories récupérées par les capteurs solaires vers le lieu de consommation ou de stockage. Nous allons ainsi aborder le choix le liquide, le dimensionnement des canalisations, les méthodes de couplage des panneaux, etc.

Inventaire des composants

Le circuit primaire de capteur solaire

Le schéma de la figure 3.1 réunit l'ensemble des composants que l'on peut trouver dans un circuit « primaire » de capteur solaire[1]. L'utilisation de ce type de circuit (c'est le cas de figure le plus fréquent, plancher solaire direct mis à part) permet de séparer le liquide primaire, circulant dans les capteurs, de l'eau utilisée dans la maison. Le circuit contient alors un échangeur de chaleur qui isole les deux fluides et permet le transfert de calories.

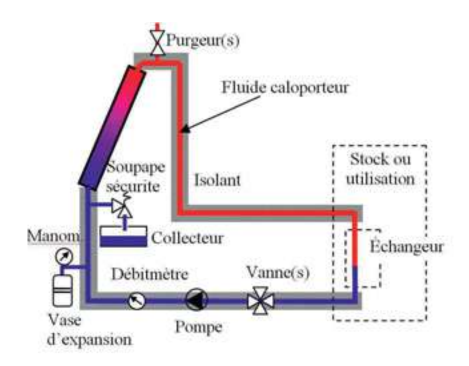


Figure 3.1
Circuit primaire.

Nous allons décrire les différents éléments d'un circuit primaire dans ce chapitre.

- Le fluide caloporteur, qui transporte les calories entre les différents éléments du système.
- Les purgeurs, qui permettent de chasser l'air du circuit. Ils peuvent être manuels ou automatiques. Il est recommandé de disposer une vanne manuelle en amont des purgeurs pour maîtriser les fuites.
- Un ensemble vase d'expansion/soupape de sécurité, qui assure l'intégrité du système en cas de surchauffe. Un vase de récupération est placé sous la soupape, car l'antigel (que l'on ajoute au fluide caloporteur) est coûteux…
- Quelques accessoires tels que le manomètre et le débitmètre. Ce dernier, qui peut être à flotteur ou constitué d'un compteur d'eau chaude, est souvent complété d'une vanne d'étranglement pour régler le débit. Son fonctionnement n'est pas nécessaire en permanence.
- Les tuyaux entre la source de chaleur et son utilisation.
- L'isolant.
- Les pompes.
- Les vannes manuelles, qui permettent d'isoler certaines parties du montage (pour la maintenance).
- Les vannes motorisées (ou non) trois voies, qui orientent le flux provenant de l'une des deux entrées vers la sortie. Elles peuvent être montées dans le sens inverse, auquel cas elles orientent le flux d'entrée vers l'une des deux sorties. Elles sont de type tout ou rien (vanne à siège) ou proportionnelles (vanne à secteur). Leur fonctionnement est détaillé dans le chapitre *Contrôler la chaleur* (voir p. 55).
- Les vannes quatre voies, généralement à secteur, principalement utilisées lorsque l'on dispose de plusieurs sources indépendantes de chaleur (solaire, fuel, bois, etc.).
- Les capteurs, que nous avons présentés dans le chapitre précédent. Nous aborderons ici les problèmes liés à la façon dont on associe plusieurs capteurs.

1 Les accessoires électroniques nécessaires à la régulation de l'ensemble ne sont pas représentés sur le schéma. Ces informations sont détaillées dans le chapitre *Contrôler la chaleur*, p. 55.

Dans l'installation présentée sur la figure 3.1, tous les accessoires hydrauliques ont été placés sur le tuyau froid de l'installation. Cette disposition permet d'augmenter leur durée de vie, car, en cas de problème ou de surdimensionnement, l'eau peut atteindre plus de 100 °C dans le tuyau chaud.

Le circuit secondaire d'utilisation des calories pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage

On trouve les mêmes composants que ceux que nous venons de présenter dans le circuit d'utilisation des calories pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage, et d'autres plus spécifiques.

Il est très difficile de réaliser un schéma générique de circuit secondaire tant le nombre de solutions possibles est important. Le lecteur pourra se reporter aux expériences décrites dans ce livre pour voir quelques exemples concrets.

Les composants plus spécifiques des circuits secondaires sont : les clapets antiretour, les vannes thermostatiques, les groupes de sécurité.

Les clapets antiretour

Ce sont des composants qui n'autorisent le passage du fluide que dans un seul sens. Il en existe de deux types : à ressort ou à battant.

- Le **clapet antiretour à ressort** est une soupape qui se ferme lorsqu'il n'y a pas de pression. Il est complètement étanche en position fermée, et peut être monté dans toutes les positions. Mais il entraîne de fortes pertes de charge, et à long terme l'axe de la soupape peut se gripper.
- Le **clapet antiretour à battant** est constitué d'un volet qui se ferme simplement sous l'effet de la gravité. Ce système est simple, fiable, et n'occasionne que très peu de pertes de charge. Il se monte sous certaines positions (volet « en haut »), et n'est pas toujours totalement étanche en position fermée (ce qui n'est généralement pas problématique).

Les vannes thermostatiques

Il s'agit d'une vanne à siège trois voies commandée mécaniquement par la température de sortie (voir le chapitre *Contrôler la chaleur*, p. 55). Lorsque la température de sortie augmente, l'entrée chaude diminue et l'entrée froide augmente en ouverture. Elle permet donc d'obtenir une température d'utilisation constante quelle que soit la température d'entrée. Sur une installation eau chaude sanitaire, ce type de vanne permet d'éviter de s'ébouillanter en été, et de limiter les pertes dans les tuyaux d'eau chaude.

Ce type de vanne peut également être utilisé à l'envers, pour diriger le flux entrant vers l'une des deux sorties selon sa température.

Les groupes de sécurité

Il s'agit d'une soupape de sécurité, généralement tarée à 6 bar, utilisée en entrée de ballon eau chaude sanitaire. Elle protège l'installation contre les surpressions liées à la dilatation de l'eau du ballon (lorsqu'elle est chauffée). Le groupe de sécurité est muni d'un clapet antiretour intégré qui empêche toute pollution du réseau d'eau froide (potable) par les germes éventuels du ballon.

En plus du groupe de sécurité, il est recommandé de poser un vase d'expansion. Un groupe de sécurité sans vase fuit très régulièrement, ce qui provoque à la fois une perte financière et un encrassage du groupe (si l'eau utilisée est très calcaire, l'utilisation d'un vase d'expansion s'impose).

Le choix du fluide caloporteur

Les propriétés du fluide caloporteur

Les propriétés attendues du fluide caloporteur sont les suivantes.

- Une bonne capacité calorifique : il doit s'échauffer peu pour une même quantité de chaleur absorbée, ce qui limite les pertes thermiques dans les canalisations. L'eau pure est de ce point de vue le meilleur liquide ; un antigel diminue cette capacité calorifique.
- Une faible viscosité, ce qui facilite la circulation dans les canalisations. L'eau pure a également cette qualité ; l'antigel augmente la viscosité de l'eau.
- Une bonne résistance au gel – plus exactement, le fluide ne doit pas provoquer de dégâts en cas de gel. Pour cela, l'ajout d'antigel s'impose.
- Une bonne résistance à de fortes températures, ce qui arrive en cas de stagnation.
- Un caractère non corrosif. Il faut par exemple éviter d'utiliser l'eau de la piscine dans le circuit primaire, car le cuivre est incompatible avec le chlore.

Certaines personnes mettent de l'huile dans le circuit primaire pour répondre aux deux derniers points, mais c'est au détriment des deux premiers. Ainsi, dans la plupart des installations solaires, c'est un fluide antigel qui est utilisé pour se protéger des températures négatives, lorsque le soleil ne rayonne pas (sauf dans les installations autovidangeables, voir p. 36).

Le fluide caloporteur circule dans le ballon de stockage à travers un échangeur (sous forme de serpentin) placé à l'intérieur du ballon. Il peut arriver, en

cas de perforation de l'échangeur suite par exemple à son oxydation, que le fluide solaire se mélange à l'eau chaude du ballon. Dans le cas d'un ballon eau chaude sanitaire, cette eau contenant du fluide caloporteur solaire peut alors être consommée. Nous vous recommandons donc fortement d'utiliser un fluide solaire de qualité alimentaire (eau ou mélange eau et monopropylène glycol).

À retenir

Lors de la conception d'une installation solaire, on se préoccupe principalement du rendement des capteurs, de la taille du ballon de stockage et de la capacité d'élévation de sa pompe solaire. Mais il ne faut pas oublier que la nature du fluide caloporteur est un élément crucial.

Eau + antigel

Présentation

Le fluide caloporteur habituellement utilisé est un mélange de monopropylène glycol dilué dans de l'eau permettant de conserver un état liquide avec une température de – 25 °C. L'inconvénient de ce type de fluide est qu'il subit un vieillissement précoce, se traduisant entre autres par une coagulation lorsqu'il est exposé à des températures supérieures à 170 °C. Au-delà de 200 °C, une lente modification chimique du liquide s'opère, qui induit une perte de la propriété antigel et une augmentation de la viscosité.

Les installations solaires en boucle fermée pressurisée et fonctionnant au monopropylène glycol doivent donc impérativement être vidangées tous les trois ans environ pour éviter les dégradations : obstruction des canalisations, éclatement des liaisons à cause du gel, etc. C'est souvent l'installateur, deux ans après la mise en service, qui indique qu'il faut procéder à la vidange du circuit et au remplacement du fluide caloporteur – ce qui n'est pas prévu dans le devis initial…

Durée de vie

La dégradation du fluide caloporteur étant liée aux surchauffes (voir encadré *Constat*, p. 23), nous allons passer en revue les différents modes de fonctionnement du circuit de capteur solaire et analyser les comportements probables du fluide solaire.

La première question à se poser concerne le fonctionnement attendu du système : va-t-il connaître des périodes de saturation (arrêt de fonctionnement du ballon car la température limite est atteinte), ou a-t-il été conçu pour ne jamais connaître de surchauffe ? Concrètement, si la surface du champ de capteurs solaires a été surdimensionnée et/ou inclinée faiblement, il faudra sans doute stopper la circulation du fluide solaire à certains moments en été car la température limite du ballon aura été atteinte ; le capteur va alors tendre à atteindre sa température maximale.

Il est donc intéressant d'analyser quelle est la température maximale que le capteur est en mesure de donner. Pour cela, il faut se reporter aux courbes données dans *Comparaison entre capteurs plans et à tubes* (voir p. 18).

▶ Capteurs plans

À rendement nul (lorsque les pertes sont égales aux apports solaires), les capteurs plans atteignent des écarts de température compris entre 100 et 130 °C. Avec une température extérieure de 25 °C, la température atteinte à l'intérieur du capteur avoisine donc les 150 °C.

Le fluide solaire est alors relativement protégé, quelle que soit sa température interne. Néanmoins, le fait d'approcher des températures limites dénature plus ou moins rapidement le liquide solaire, après quelques années.

▶ Capteurs à tubes sous vide

Pour les capteurs à tubes, la saturation se situe bien au-dessus, entre 180 et 250 °C (certains atteignent même 340 °C : la soudure à l'étain est à proscrire !). La température interne du capteur est donc de 230 °C.

Dès le premier été suivant l'installation, le fluide solaire sera dénaturé. Pour éviter cela, il faut modifier l'installation pour ajouter un circuit de décharge, revoir l'inclinaison des capteurs ou augmenter la consommation.

Une autre solution, pragmatique, consiste à recouvrir une partie des capteurs du printemps à l'automne (voir encadré).

Rappel

Plutôt que de rechercher la meilleure exposition au sud, il est préférable d'incliner un champ de capteurs le plus possible à la verticale, et éventuellement de le munir d'une visière pare-soleil, pour limiter la production en été et la favoriser en mi-saison ou en hiver (voir *L'orientation et l'inclinaison des capteurs, les masques*, p. 9).

Eau

Les propriétés fondamentales de l'eau n'étant pas modifiées avec la chaleur ou le froid, elle peut être utilisée de deux façons différentes : en circuit autovidangeable ou en boucle fermée pressurisée avec une gestion antigel électronique.

Capteurs autovidangeables

Avec ce type de capteur, le fluide solaire n'est sollicité que si la pompe de circulation fonctionne (c'est-à-dire lorsque le capteur est exposé au soleil).

- Avec des capteurs plans, il n'y a pas de souci particulier car le fluide n'est plus présent lorsque la température maximale du ballon est atteinte ou s'il gèle. De plus, l'eau « pure » ne subit pas de dégradation particulière lorsqu'elle chauffe.
- Avec des capteurs à tubes sous vide, il faut dimensionner l'installation pour éviter que le capteur soit exposé au soleil sans sollicitation : la surface des capteurs doit donc être sous-dimensionnée.



Figure 3.2
Exemple d'installation autovidangeable : le ballon blanc, en haut à gauche de l'image, permet de vider le circuit des capteurs.

> **Sécurité**
>
> Il est important de prévoir un système de sécurité (intégré d'emblée à certains contrôleurs) qui empêche la remise en marche de la pompe de circulation lorsque la température haute a été atteinte en cours de pompage, même en cas de besoin ultérieur de chauffe dans le ballon. Une telle remise en marche ne devrait en effet jamais arriver, cet état constituant un dysfonctionnement nécessitant une maintenance. Ceci est vrai quel que soit le type d'installation : capteurs plans ou à tubes, tubes autovidangeables ou pressurisés.

Boucle fermée pressurisée

L'utilisation de l'eau « pure » en boucle fermée pressurisée peut inquiéter de prime abord. Cependant, certains contrôleurs solaires sont capables de gérer l'antigel de façon électronique.

Lorsque la température ambiante à l'intérieur du capteur est inférieure à 5 °C par exemple, le contrôleur provoque la circulation du fluide solaire et restitue une petite partie des calories captée dans la journée en élevant ainsi temporairement la température des capteurs solaires. Le cycle est répété autant de fois que nécessaire.

Pour que ce système fonctionne sans trop de pertes, il faut considérer que le capteur ne doit pas, par conception, être un dissipateur de calories. Aussi ce mode de fonctionnement est-il surtout adapté aux capteurs à tubes sous vide à liaisons sèches (caloduc), car ce type de capteur minimise de façon importante la surface d'échange avec l'extérieur.

Dans le cas d'un capteur plan ou d'un capteur à tubes sous vide avec circulation du fluide dans la totalité du capteur, les pertes seront supérieures, voire dépasseront les apports du solaire dans une journée dans certaines régions froides. Le système de boucle fermée pressurisée est alors totalement inefficace.

La circulation du fluide

Après avoir choisi le liquide caloporteur, il faut envisager sa circulation entre la source de chaleur et le lieu de stockage des calories. Cette circulation se fait par gravité (c'est la circulation en thermosiphon) ou, plus couramment, en utilisant une pompe (généralement électrique).

Thermosiphon

La circulation par thermosiphon tire tout simplement parti du fait que l'eau froide est plus lourde que l'eau chaude.

L'eau froide située dans le stock, plus lourde que l'eau chaude, « tombe » dans le bas du panneau, où elle est réchauffée. Ce réchauffement dilate l'eau, qui devient

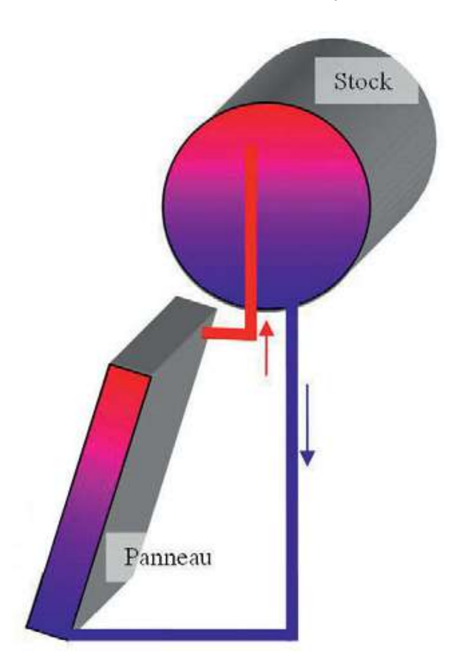


Figure 3.3
Schéma de principe d'un système fonctionnant en thermosiphon.

donc plus légère : elle remonte dans le panneau, puis dans le stock. Une pompe naturelle a ainsi été amorcée, qui fonctionne tant que le panneau peut élever la température du fluide, et qui s'arrête d'elle-même lorsque l'énergie solaire est insuffisante.

Ce système présente l'avantage d'être complètement passif : il n'est pas nécessaire de disposer d'une énergie annexe. On n'utilise ni pompe, ni sonde, ni régulation.

L'inconvénient est que le stock doit être situé au-dessus (et, dans une moindre mesure, à proximité) de la source de chaleur. Cela pose des problèmes d'infrastructure (quel élément de la construction va supporter le poids du stock ?), d'esthétique et éventuellement d'isolation du stock. Du fait de cette dernière contrainte, cette solution est surtout répandue dans les pays où le gel est moins à craindre que les coupures d'électricité, ou dans le cadre d'utilisations saisonnières (camping par exemple) permettant une vidange du stock en hiver.

Circulateur

Une pompe permet de pousser le liquide, et de supprimer toute contrainte de positionnement relatif des composants. L'inconvénient est qu'il ne s'agit pas d'un système passif : il faut de l'électricité et quelques composants de régulation pour faire démarrer la pompe lorsque le stock est plus froid que le capteur. Plus que le coût de fonctionnement, le problème est ici celui de l'autonomie du système face à une éventuelle coupure d'électricité.

Les systèmes solaires utilisent généralement des pompes de chauffage appelées circulateurs. Contrairement à ce qui se pratique lorsqu'elles sont implantées dans un circuit de chauffage, elles sont placées sur l'eau froide : on évite ainsi qu'elles fonctionnent avec de la vapeur.

Ce sont des pompes refoulantes, ce qui signifie qu'elles poussent l'eau facilement, mais l'aspirent très mal. Il est donc nécessaire de les placer sur un point bas et/ou d'avoir un circuit sous pression.

Figure 3.4
Schéma de principe d'un système fonctionnant avec circulateur.

Le raccordement des capteurs

Le raccordement des capteurs doit être fait de manière à faire circuler, dans chacun d'eux, la même quantité d'eau par unité de temps. Si cette condition n'est pas respectée, une partie du champ présentera un débit trop important pour augmenter significativement la température. Et l'autre partie aura un débit trop faible (pouvant même être nul). Ce type de dysfonctionnement provoquera des surchauffes locales néfastes au mélange antigel, dont le rendement utile sera de toute façon nul.

Le principe de base est simple : l'eau emploie toujours le plus court chemin pour aller d'un point à un autre.

Raccordement avec ajout d'une vanne d'étranglement

Dans le schéma de la figure 3.5, l'eau va de préférence passer par le capteur à tubes du bas, car le circuit sur lequel il est situé est plus court que celui menant aux deux autres capteurs (il s'agit donc du plus court chemin permettant à l'eau de se réchauffer). Ainsi, environ 60 % du débit passe par le capteur du bas et 40 % en haut, alors que, dans un fonctionnement équilibré, 33 % du débit passerait en bas et 66 % en haut.

Pour pallier ce type de défaut, on doit installer une vanne d'étranglement qui limite le débit dans le capteur du bas. Cette solution, parfois incontournable, présente l'inconvénient de nécessiter un réglage parfois délicat et de générer une perte de charge globale du système.

Raccordement en série

Pour que tous les capteurs voient circuler la même quantité d'eau par unité de temps, une solution est de les relier en série les uns après les autres (figure 3.6).

Ce type de montage présente deux inconvénients dès lors qu'il y a plus de deux panneaux : les pertes de charge sont importantes, et le dernier capteur en bout de ligne a un mauvais rendement car il chauffe de l'eau déjà réchauffée par les capteurs précédents.

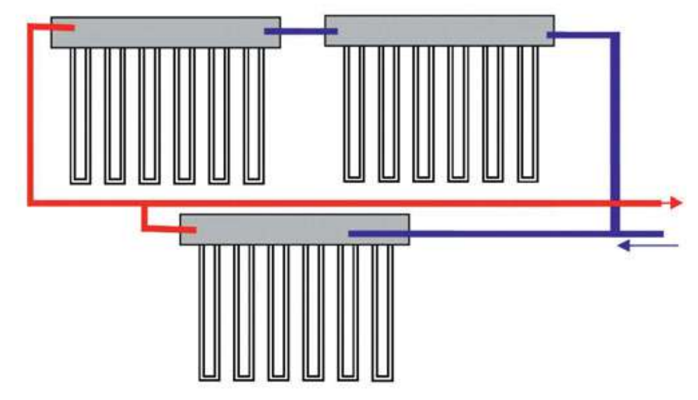


Figure 3.5
Raccordement non optimal des capteurs.

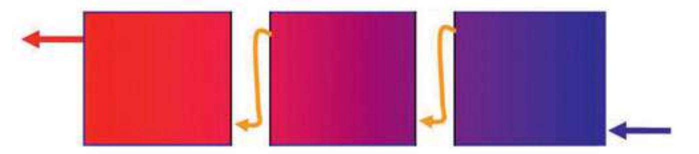


Figure 3.6
Raccordement des capteurs en série : le réchauffement de l'eau n'est plus optimisé au-delà de deux capteurs.

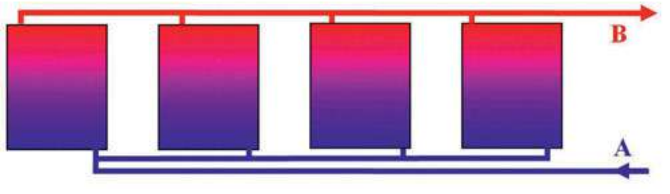
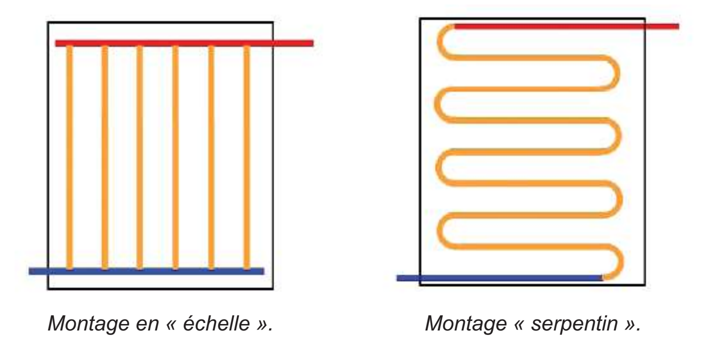


Figure 3.7
Boucle de Tickelman : le réchauffement de l'eau dans les capteurs est optimisé.



Montage en « échelle ». *Montage « serpentin ».*

Figure 3.8

Boucle de Tickelman

Dès que l'on dépasse deux capteurs, il est nécessaire de les placer en parallèle et, puisque l'eau emprunte toujours le plus court chemin, de faire en sorte que tous les chemins soient équivalents. C'est ce que l'on appelle le principe (ou la boucle) de Tickelman.

On le voit sur la figure 3.7 : quel que soit le panneau traversé, la somme des longueurs de tuyaux pour aller de A à B est la même. La perte de charge est équivalente quel que soit le trajet, le débit va donc se répartir de façon uniforme dans les différents panneaux. Il faut toutefois préciser que cette répartition strictement égale n'est possible qu'à condition que le diamètre des tuyaux collecteurs soit suffisamment grand pour que la perte de charge des tubes d'alimentation soit inférieure (d'un facteur au moins trois) à celle de chaque panneau.

La plupart des panneaux plans étant désormais en « échelle » (figure 3.8), ils présentent une perte de charge très faible rendant la condition précédente impossible à satisfaire dans la pratique. Dans le cas de la « mise en Tickelman » de plus de trois panneaux à faible perte de charge, il sera donc utile de prévoir des moyens de réglage sur les panneaux extrêmes.

Généralement, dans un souci de simplicité et d'efficacité, on sépare les panneaux en plusieurs groupes de quatre capteurs au plus.

Installation à grande échelle

Dans les installations plus conséquentes que celles décrites dans cet ouvrage, il est courant de mélanger les techniques d'assemblage : les panneaux sont branchés en série par groupes de trois ou quatre afin d'obtenir une perte de charge significative, puis chacun de ces groupes est relié en boucle de Tickelman sur le système global.

Montage classique

Le dernier montage que nous allons étudier est très classique. Certains l'appellent « montage série » (mécaniquement), mais hydrauliquement il s'agit d'un montage parallèle (figure 3.9). Il présente le très grand avantage d'être simple à réaliser et de minimiser la distance entre les panneaux.

Ce montage est une variante « industrialisée » et compacte de la boucle de Tickelman. Il fonctionne très bien dès lors que le diamètre des collecteurs (tuyaux bleus et rouges sur la figure 3.9) est au moins trois fois supérieur à celui des échangeurs. Les préconisations que l'on peut faire concernant le nombre de panneaux associables de cette façon restent les mêmes : pas plus de quatre, à moins d'avoir des collecteurs surdimensionnés. La figure 3.10 est un exemple de montage de six panneaux en deux groupes de trois.

Un dernier point doit être souligné au sujet de la boucle de Tickelman : ce type de montage consomme plus de cuivre qu'un raccordement direct puisqu'il augmente la longueur de collecteurs. Il convient donc de choisir la solution la mieux adaptée.

> **Optimiser la boucle de Tickelman**
>
> Il est rare que les branches de départ et de retour des capteurs soient de la même longueur. On veillera donc à ce que l'alimentation en eau froide soit la plus longue, ce qui permet de limiter les pertes de chaleur.

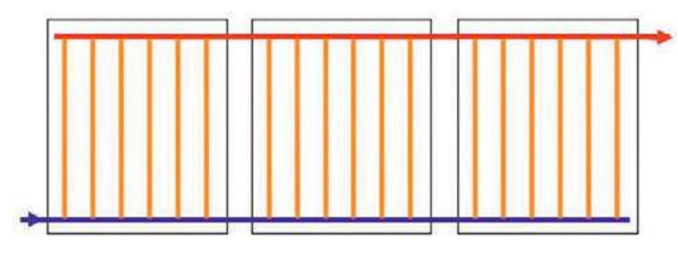


Figure 3.9
Montage classique.

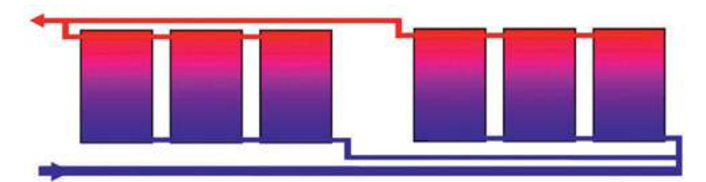


Figure 3.10
Montage de six panneaux.

La nature des tuyaux

La nature des composants de la liaison entre le champ de capteurs et le stockage est importante. Plusieurs matériaux peuvent être utilisés : le polyamide, le PER (polyéthylène reticulé), le cuivre ou l'inox. Le choix, encore une fois, dépend de la solution technique envisagée et des performances globales du système.

Les propriétés attendues

Les tuyaux (et les autres composants, en incluant les joints) doivent être :

- résistants thermiquement sur toute la plage de températures possibles (– 20 à + 150 °C, et plus en cas d'accident sur des capteurs à tubes), surtout à proximité immédiate des capteurs ;
- compatibles avec le fluide employé (par exemple, le zinc est attaqué par l'antigel) ;
- posés de façon à supporter les variations de longueur et autres contraintes dues à la dilatation. Notamment, il n'est pas recommandé de braser à l'étain les raccords en cuivre.

Les matériaux les plus utilisés

Le PER

Le PER n'est pas cher (toutefois les raccords augmentent le prix), et s'avère relativement facile à manipuler. Mais il présente deux inconvénients principaux.

D'abord, il ne supporte pas une température égale ou supérieure à 150 °C. On ne l'utilisera donc pas à proximité des capteurs (au moins 3 m). Plus généralement, il faut s'assurer que rien n'y circule à plus de 80 °C, sous pression, de façon permanente.

Le second inconvénient est son coefficient de dilatation très important. Pour une différence de 100 °C, 1 m de PER s'allonge de 2 cm. Il faut donc prévoir des boucles de dilatation.

Le cuivre

C'est un matériau cher et qui nécessite un peu d'outillage. Mais la soudure est simple.

Son coefficient de dilatation est faible, mais non négligeable : pour une différence de 100 °C, 1 m de cuivre s'allonge de 1,7 mm. Il ne faut pas négliger ce problème mécanique, car, par exemple, pour la même variation de température, un champ de quatre panneaux de 2 m de large s'allonge de 13,6 mm.

Le cuivre écroui (rigide) est préféré pour les liaisons dont le montage est aisé, et le cuivre recuit (souple) pour les mises en œuvre difficiles.

L'acier (inox)

L'acier a le plus faible coefficient de dilatation : seulement 1,2 mm d'allongement pour une différence de 100 °C.

Il est surtout intéressant sous forme de tuyau ou de raccord annelé. Ce type de tuyau, extrêmement souple, permet en particulier de faire des raccords (sur mesure) pouvant absorber les différences de longueurs liées à la dilatation.

Il existe en grandes longueurs préisolées chez certains fabricants.

La tenue en pression

La tenue en pression des tuyaux n'est pas une question cruciale, car seuls deux types de systèmes sont disponibles sur le marché : la boucle fermée pressurisée et le circuit autovidangeable.

Dans le cas de la boucle fermée pressurisée, la pompe solaire est équipée d'une soupape de sécurité tarée à 6 bar. Toutes les liaisons doivent donc tenir les 6 bar ; lorsque la pression présente dans le circuit dépasse cette limite, la soupape se déclenche et réduit la pression à 6 bar.

Déclenchement de la soupape de sécurité

Il est important de comprendre que, si la soupape de sécurité se déclenche et limite la pression à 6 bar, quelque chose d'anormal s'est passé dans le circuit : la pression est montée brusquement du fait d'une hausse de température anormale. Lorsque la température revient dans une plage acceptable, la pression baisse et le fluide solaire retiré du circuit vient à manquer : il faut alors recharger en fluide solaire.

Normalement, en boucle fermée pressurisée, la pression dans le circuit doit être de 1 à 1,5 bar au niveau du capteur, et un peu plus au niveau du ballon et de la pompe solaire. Le vase d'expansion fonctionne correctement à une valeur seuil d'environ 2,5 bar.

En circuit autovidangeable, on travaille à pression hydrostatique (hauteur de colonne d'eau). La pression est donc quasiment nulle dans le circuit.

Le raccordement des liaisons

Plusieurs solutions sont possibles : joint, raccord à bague, sertissage, etc.

Les joints

Ils sont utilisés avec le flexible inox onduleux. Ce sont impérativement des joints eau/gaz avec une tenue en température de 350 °C. Ils sont reconnaissables à leur couleur bleue.

Les raccords à bague

C'est la solution idéale avec du cuivre. Sans soudure, ces raccords permettent une tenue en pression et en température très satisfaisante.

Les raccords à bague peuvent également être utilisés avec le flexible polyamide. Mais, lors du serrage du raccord, il faut enfiler une sous-bague dans le tuyau avant de sertir l'olive.

Le sertissage

Le sertissage est applicable sur le cuivre ou le PER. C'est une solution intéressante, mais qui nécessite de l'outillage.

L'isolation de la tuyauterie

Une isolation de très bonne qualité est nécessaire, car le fluide solaire joue sur une large échelle de température.

Évitez les isolants bas de gamme. Armaflex est une marque connue, mais il faut savoir qu'elle propose une gamme de produits qui va du grand public au produit dédié au solaire. C'est la qualité adaptée aux circuits solaires qu'il faut choisir.

Liaisons extérieures et liaison chaude

Les liaisons extérieures et la liaison chaude (retour du capteur au stockage) doivent être protégées avec un isolant spécialement conçu pour le solaire, résistant aux UV et aux très hautes températures (à partir de 150 °C).

Nous suggérons des produits de type Eurobatex de NMC, ou équivalent. Dans tous les cas, il est nécessaire de s'adresser à un distributeur fournissant les chauffagistes.

Les isolants des liaisons extérieures doivent présenter un taux de cellules fermées voisin de 100 % pour empêcher l'humidité de s'infiltrer dans l'isolant (ce qui annulerait assez rapidement ses capacités). Cela est valable pour les liaisons aériennes, mais surtout pour les liaisons enterrées.

Caractéristiques techniques requises pour les liaisons extérieures et les liaisons chaudes

Domaine d'application	– 40 °C à + 150 °C
Conductibilité thermique à 40 °C	λ = 0,044 W/m.K
Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau	μ ≥ 5 000
Résistance à l'ozone	Excellente

Il faut également protéger les isolants solaires des oiseaux, et parfois dissimuler leur couleur noire qui jure avec les teintes rouges des tuiles. Une solution efficace est de passer au pinceau plusieurs couches d'enduit de protection et d'étanchéité de toiture (de type Dyrup ou Sika). Différentes couleurs reprenant les teintes traditionnelles des tuiles des régions françaises sont disponibles.

Liaisons intérieures

Les liaisons intérieures peuvent avoir à supporter des températures avoisinant 70 °C. Là encore, les isolants bon marché sont à proscrire.

Nous suggérons d'utiliser des produits de type Insultube de NMC, ou équivalents, vendus chez les distributeurs des plombiers et chauffagistes. Le tableau ci-dessus en donne les caractéristiques principales.

Le dimensionnement de la tuyauterie

Afin de comprendre quelques règles de base, nous allons prendre pour exemple le calcul d'un circuit type (figure 3.11).

On trouve beaucoup d'information à ce sujet sur Internet, y compris des feuilles de calcul[2].

Les pertes de charge

La difficulté qu'a un liquide pour passer dans un tuyau, et donc pour une pompe de l'y pousser, s'exprime en perte de pression ou de charge. La pression est plus forte à l'entrée du tuyau qu'à sa sortie. Cet écart de pression devrait être mesuré en hectopascals (hPa), l'unité du système international, mais en pratique les plombiers utilisent le bar ou le mbar, ou la hauteur équivalente d'une colonne d'eau (HECE ou HCE), ou encore la hauteur manométrique (HM).

Unités de mesure de pression et des pertes de charge

1 bar = 1 000 mbar = 10 m d'eau (soit 10 mCE = 10 mHM) = 1 000 hPa.

1 mbar = 10 mm d'eau = 10 mmCE = 10 mmHM

Plus le tuyau est long, plus la perte de charge augmente (de façon proportionnelle) : il faut 10 fois plus d'énergie pour pousser de l'eau dans 10 m de tuyau que dans 1 m.

Lorsque le débit augmente, il faut également plus d'énergie pour pousser le liquide. La variation est dans ce cas proportionnelle au carré du débit : il faut 100 fois plus d'énergie pour un débit de 100 l/h que pour un débit de 10 l/h. C'est une des raisons qui font que les constructeurs de panneaux solaires recommandent un débit minimal pour que la règle de Tickelman s'applique (c'est-à-dire que les pertes dans les collecteurs soient plus faibles que dans les absorbeurs).

Exemple de caractéristiques techniques pour les liaisons intérieures

Domaine d'application	– 40 °C à + 105 °C
Conductibilité thermique à 40 °C	λ = 0,040 W/m.K
Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau	μ ≥ 5 000

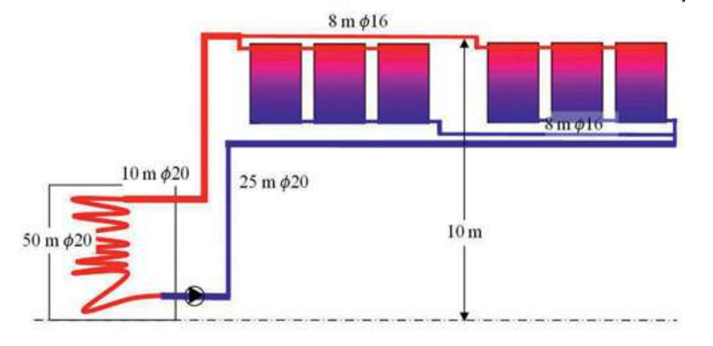


Figure 3.11
Circuit type, constitué de six panneaux de 2,25 m². Le débit recommandé est de 120l/h. La perte de pression est de 2 mbar.

2 À l'adresse http://perso.orange.fr/herve.silve/, on trouve des conseils pour l'étude et la réalisation de l'installation de chauffage.

Les règles de calcul sont les suivantes :

- lorsque des éléments sont en série, leurs pertes de charge s'ajoutent ;
- lorsque des éléments sont en parallèle, les débits s'équilibrent de manière à obtenir une perte de charge identique dans chaque branche.

Débit nécessaire

Le premier point est de calculer le débit nécessaire de l'installation. On admet généralement que le débit nécessaire doit être de 50 l par mètre carré de capteur et par heure.

Ce compromis permet :

- d'avoir une eau pas trop chaude dans les tuyaux pour limiter les pertes ;
- de limiter le débit global à des valeurs réalistes ;
- d'assurer une certaine uniformité de la circulation dans les panneaux (l'uniformité est meilleure avec un débit plus fort).

Dans le cas de la figure 3.11, nous devons assurer un débit de : 50 l/m² × 2,25 m² × 6 panneaux = 675 l/h au niveau de la pompe, et de 338 l/h dans chaque branche Tickelman.

Pertes dans les tuyaux

Première approximation des pertes

Les pertes sont relativement complexes à calculer, mais on peut s'en faire une idée à l'aide d'abaques tels que ceux de la figure 3.12.

On lit ainsi que, pour un tuyau en cuivre de 20 mm de diamètre parcouru par un débit de 700 l/h, la perte est de 30 mm/m. Avec un diamètre de 16 mm et un débit de 350 l, la perte est de 25 mm/m.

Corrections à apporter

▶ Rugosité du matériau, viscosité du liquide

La perte de charge doit être corrigée en fonction de la rugosité du matériau (avec des matériaux en bon état – cuivre, inox ou PER –, la rugosité ne joue pas) et de la viscosité du liquide employé.

La viscosité du liquide dépend de la nature de l'antigel, de sa concentration dans le liquide, et de la température. Les figures 3.13 et 3.14 montrent ses variations à titre indicatif, car il faut se référer aux courbes correspondant à la nature exacte de l'antigel.

Pour notre exemple, nous allons dimensionner notre système autour de 60 °C avec un taux d'antigel de 30 %. Sur la figure 3.14, on déduit une viscosité de 7 environ. La courbe de la figure 3.13 montre qu'il convient d'appliquer un facteur correctif de 2 environ entre la courbe à viscosité de 1 et celle de 7. Pour 675 l/h à la pompe, les pertes sont donc de 60 mm/m dans la partie en tuyau de 20 mm, et de 50 mm/m dans la partie en tuyau de 16 mm.

▶ Pertes singulières

Il convient d'ajouter à ces calculs les pertes dites singulières, liées à la présence de coudes, bavures et autres accessoires.

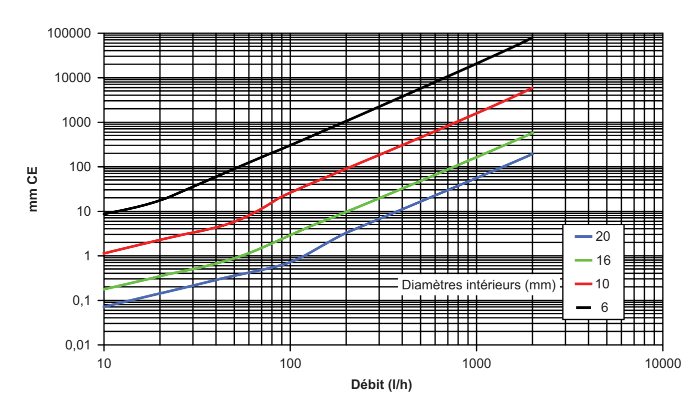


Figure 3.12
Exemple d'abaque permettant le calcul des pertes. CE : colonne d'eau.

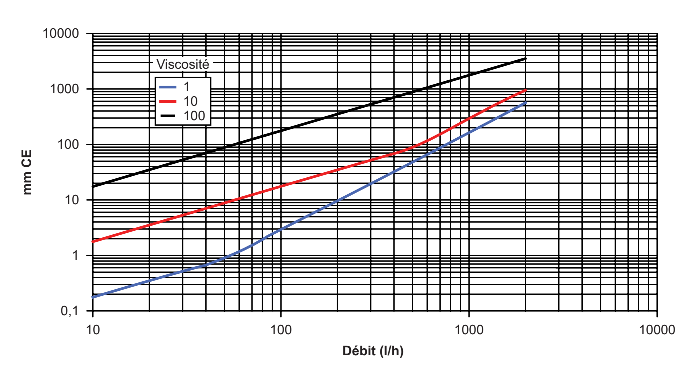


Figure 3.13
Perte de charge en fonction de la viscosité pour 1 m de cuivre diamètre 16 mm.

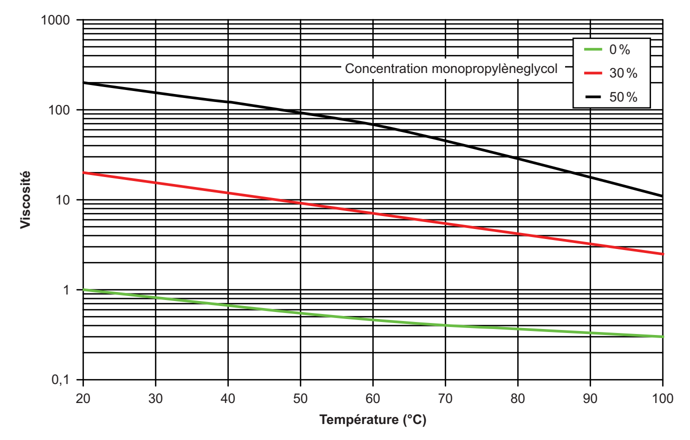


Figure 3.14
Variation de la viscosité.

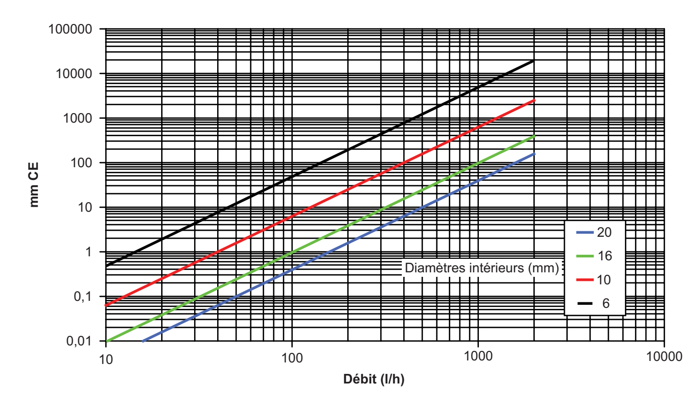


Figure 3.15
Perte de charge pour un coude.

Décomposition des pertes dans le circuit

Partie du circuit	Calcul	Perte
Dans le serpentin	50 × 60 mm/m	3 000 mm
Dans les collecteurs principaux	35 × 60 mm/m	2 100 mm
Dans les collecteurs secondaires (8 m)	8 × 50 mm/m	400 mm
Dans les coudes		220 mm
Dans les panneaux	2 mbar	20 mm
Total		**5 740 mm**

Le coude sert ici d'unité de base pour évaluer les pertes singulières. Comme le montre le tableau, les autres types de cause de perte peuvent trouver des équivalents en coudes.

La perte causée par un coude est donnée par la formule : perte = vitesse^2 / 2g, illustrée par les courbes de la figure 3.15.

On suppose que l'exemple comporte 6 coudes en diamètre 20 et 2 T, ainsi que 5 coudes en diamètre 16. Selon l'abaque de la figure 3.15, un coude de 20 à 750 l/h représente une perte de 20 mm et un coude de 16 à 350 l/h, 12 mm. On totalise donc une perte de : (6 + 2) × 20 + 5 × 12 = 220 mm.

Pertes singulières, équivalences en coudes

Accessoires	Nombre de coudes
1 bavure de coupe tube 1 raccord union 1 T 2 vannes sphériques	1 coude
1 vanne 3 voies	5 coudes
1 antiretour à battant	2 coudes
1 antiretour à ressort	20 coudes

En résumé

On suppose que le montage est équilibré. Dans ces conditions, un groupe de trois panneaux en parallèle alimentés à 360 l/h présente les pertes d'un seul à 120 l/h. Le même raisonnement s'applique pour les deux groupes en Tickelman, qui ne présentent donc que la perte d'un seul groupe à 360 l/h. Chacun des deux groupes est constitué de trois panneaux + 8 m de tuyau en diamètre 16.

Nous obtenons donc presque 6 m de pertes de charge. Pour réduire ces pertes, on peut augmenter le diamètre des

canalisations, ce qui majore le coût des tuyaux. L'installation d'une plus grosse pompe constituera probablement une solution moins coûteuse.

Un dernier point doit être pris en compte pour les montages de type autovidange : la purge du circuit est assurée par l'eau, qui doit pouvoir pousser l'air devant elle dans les tuyaux à contre-pente. Cela est possible si la vitesse de l'eau est supérieure à 400 mm/s, ce qui incite à diminuer les diamètres (figure 3.16).

Transposition du calcul de perte de charge à d'autres débits

Une transposition à d'autres débits n'impose pas de refaire tous les calculs. Il suffit de se rappeler que les pertes sont proportionnelles au carré du débit, et donc d'utiliser la formule : $Pertes_1 / Pertes_2 = (Q_1 / Q_2)^2$.

Ainsi, si l'on souhaite diminuer le débit de 50 à 40 l/m²/h, la perte de charge devient 5 740 × (40 / 50)² = 3 670 mm. Elle est presque divisée par deux.

Si l'on souhaite, plus tard, ajouter un troisième champ de panneaux, le débit dans les canalisations de diamètre 20 passera à 1080 l/h et les pertes de charge dans ces tuyaux passeront de 3 m à 3 × (1 080 / 720)² = 6,75 m. Sur cette partie, on fait plus que doubler les pertes ! Ajouter des panneaux n'est donc pas une opération neutre si la pompe n'a pas été surdimensionnée au départ.

Dimensionnement de la pompe

Nous avons donc estimé avoir une perte de charge dynamique d'environ 6 m pour un débit requis de 720 l/h.

Une pompe fonctionne de telle façon que plus le débit est important, moins la pression fournie est grande. Les circulateurs utilisés proposant généralement trois vitesses de fonctionnement, les diagrammes de performance présentent trois courbes pression/débit en fonction de la vitesse.

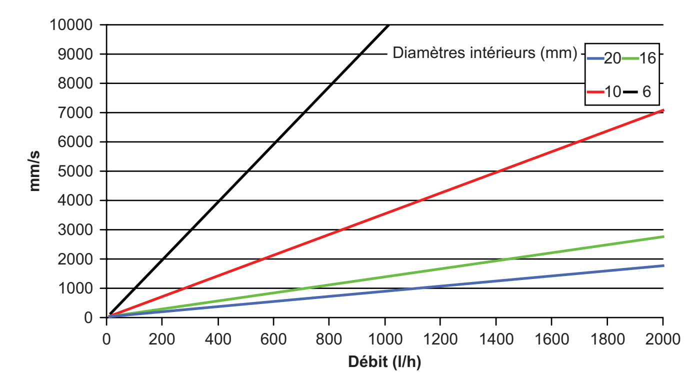


Figure 3.16
Vitesse du fluide en fonction du débit et du diamètre des tuyaux.

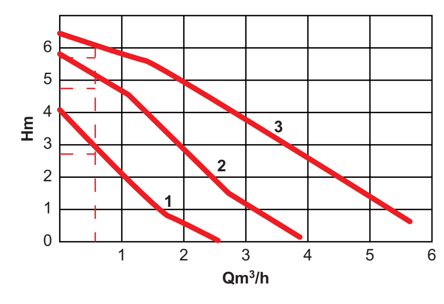


Figure 3.17
Diagramme de performance d'un circulateur (exemple 1).

Sur l'exemple de la figure 3.17, en vitesse 3, à 750 l/h, la pompe est capable de produire une pression équivalente à 6 m d'eau. Elle peut donc convenir à notre application.

À débit nul, la pression maximale est de 6,5 m. La pompe ne pourra donc remplir seule le système, ou l'empêcher de se vider, puisque les panneaux sont situés 10 m au-dessus du serpentin. Il sera nécessaire de mettre le circuit sous pression, environ 2 bar (20 mCE) mesurés au niveau du serpentin.

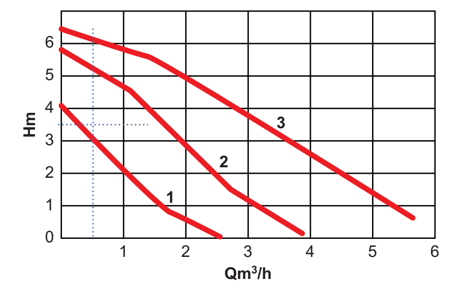


Figure 3.18
Diagramme de performance d'un circulateur (exemple 2).

Nous avons vu qu'à 40 l/m²/h, la perte de charge n'est plus que de 3 670 mm. Sur la courbe de la figure 3.17, on constate que la même pompe en vitesse 1 peut suffire.

Ceci illustre surtout qu'en passant de la vitesse 1 à la vitesse 3, le débit n'est pas multiplié par trois ! Il faut donc choisir la pompe soigneusement.

Lorsque la pompe est trop petite, plusieurs solutions sont envisageables.

Il est possible d'augmenter le diamètre des tuyaux – mais le coût des tuyaux va augmenter proportionnellement.

On peut également utiliser plusieurs pompes. Si elles sont montées en parallèle, on ne changera pas notablement le

résultat car deux pompes en parallèle ont la même pression limite. On augmentera par contre la pression limite si on monte les pompes en série (elles s'ajoutent). Ce montage fonctionne, mais la deuxième pompe constitue une perte de charge pour la première. Cette solution est parfois la seule possible pour les systèmes autovidangeables qui ont une grande différence de hauteur entre le stock et les panneaux, lorsqu'il faut purger les panneaux le temps que le siphon s'amorce.

La dernière possibilité est de passer à une pompe plus grosse. À moins d'avoir nettement sous-dimensionné les diamètres des tuyaux, cette solution est la meilleure, même si les coûts s'en ressentent lorsque l'on quitte la gamme des circulateurs grand public.

Cas particulier du thermosiphon

Les principaux éléments à prendre en compte pour le positionnement et le dimensionnement d'un thermosiphon sont les suivants :

- le stock doit se situer au moins 50 cm plus haut que les capteurs pour limiter les problèmes d'inversion la nuit (en refroidissant dans la partie haute du panneau, l'eau descend et on peut effectivement observer une circulation inversée du fluide) ;
- les pentes des tuyaux de raccordement doivent être en tous points supérieures à 5° ;
- pour déterminer le diamètre des tuyaux, on peut s'inspirer des courbes de la figure 3.19.

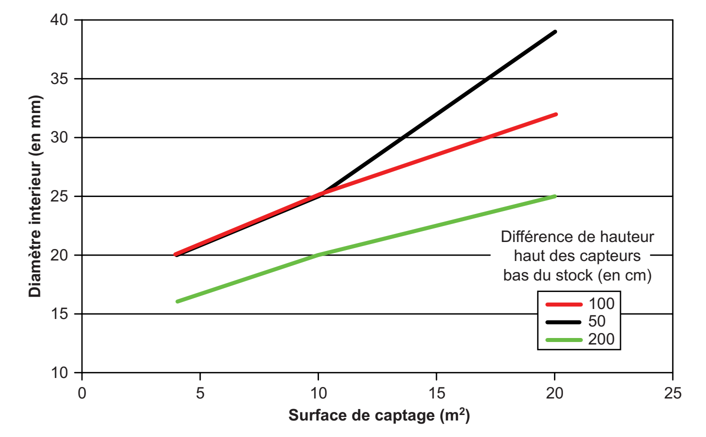


Figure 3.19
Choix du diamètre des tuyaux.

Le vase d'expansion

Nous allons étudier à présent le dimensionnement du vase d'expansion.

Circuit primaire

Utilité

Un vase d'expansion est un système qui permet d'absorber les variations de volume d'un liquide qui se réchauffe dans un circuit fermé. Ainsi, 100 l d'eau à 10 °C deviennent 105 l à 90 °C. En simplifiant, et en considérant que l'ensemble du circuit est en cuivre, le volume du circuit passe lui de 100 l à 100,2 l.

Une question se pose alors : où passent les 4,8 l d'eau restants ? Deux cas de figure sont possibles :

- à l'égout ou dans l'air, car la pression dans le circuit devient trop forte ;
- dans une sorte de chambre à air qui restitue ce volume lorsque le liquide se refroidit.

Bien entendu, pour un circuit bien conçu, c'est la seconde possibilité qui doit s'appliquer, la « chambre à air » étant le vase d'expansion.

La figure 3.20 présente le fonctionnement d'un vase d'expansion. Les abréviations

Coefficient de dilatation de l'eau

Température (en °C)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Ce	0,0003	0,0018	0,0043	0,0078	0,0120	0,0170	0,0227	0,0289	0,0358	0,0433
Température (en °C)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Ce	0,0514	0,0602	0,0696	0,0797	0,0905	0,1020	0,1140	0,1274	0,1414	0,1725

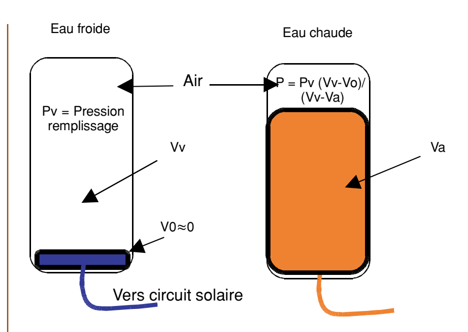


Figure 3.20
Fonctionnement d'un vase d'expansion.

utilisées en légendes sont expliquées p. 47.

Grâce à la compressibilité de l'air dans le vase, la pression n'atteint pas de valeurs dépassant celles de la soupape de sécurité.

L'eau est en général contenue dans une vessie en butyle, matériau particulièrement résistant et étanche entre 5 et 70 °C. Étant donné la température maximale de 70 °C seulement, il faut installer ce dispositif côté « eau froide » des capteurs et/ou disposer un pré-vase (vase intermédiaire) en série avec le circuit : constitué d'une réserve d'eau (froide), il absorbe les variations de température pour la vessie.

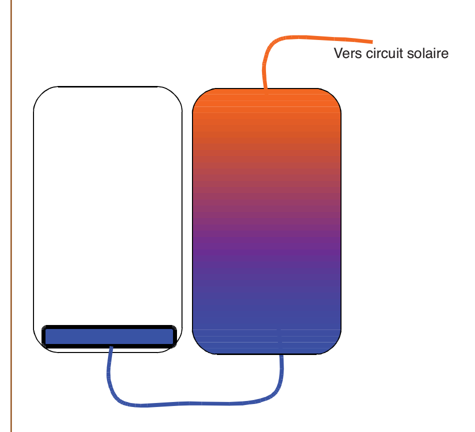


Figure 3.21
Circuit d'expansion avec vase intermédiaire.

Principes de base

Plus la pression de base est importante, plus tard se formera la vapeur du fluide considéré. Le graphique de la figure 3.22, qui met en relation la pression de vapeur et le taux de monopropylène glycol, démontre cela.

C'est pourquoi on peut penser a priori qu'une installation solaire doit avoir une pression supérieure à celle d'une installation de chauffage central : il s'agit d'éviter la formation de vapeur à l'intérieur des capteurs.

C'est pourtant une idée fausse car, lorsque le champ de capteurs est correctement dimensionné, la température à l'intérieur du capteur ne doit pas dépasser la température de fonctionnement, soit 60 °C environ. Au-delà, soit le transfert de chaleur dans l'échangeur ne fonctionne pas correctement (il faut corriger l'anomalie), soit la circulation est arrêtée car la température de consigne est atteinte. Dans ce cas, quelle que soit la pression de base dans le champ de capteurs, le liquide se vaporisera (cela est d'autant plus vrai avec des capteurs à tubes sous vide qui voient

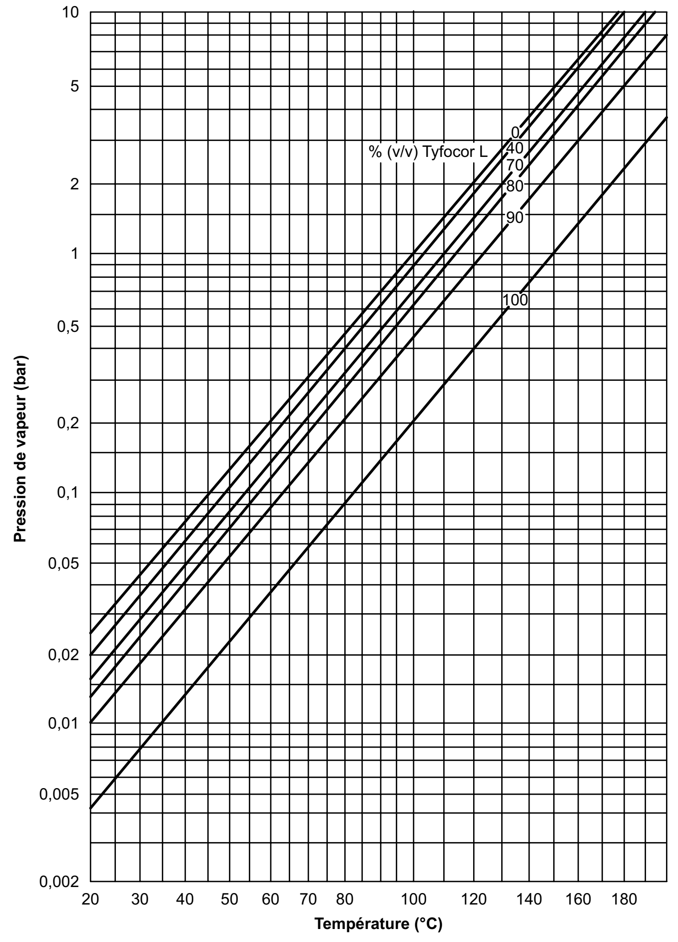


Figure 3.22
Pression de la vapeur en fonction de la température et du taux de monopropylène glycol (Tyfocor).

leur température en stagnation monter à 250 °C et plus, alors que les capteurs plans ont des températures de stagnation approchant 150 °C).

Toutefois, appliquer 0,5 bar de plus ne peut pas défavoriser le circuit :

- si une fuite est existante (surtout aux points les plus hauts de l'installation), celle-ci sera plus visible avec une légère pression qu'avec une pression nulle ;
- dans le cas de capteurs plans, la température de stagnation n'atteignant presque jamais 150 °C, si nous avons une pression au point le plus haut de 1,6 bar, par exemple, on n'observera jamais de création de vapeur.

L'important est de considérer qu'il faut du fluide solaire jusqu'au point haut de l'installation. Ainsi, la pression au point le plus bas résultera de l'addition de la hauteur de colonne d'eau et de la pression initiale au point le plus haut.

La pression appliquée en bas d'une colonne de 10 m de haut est de 1 bar. Ainsi, dans un château d'eau à pression hydrostatique (soit une installation classique urbaine avec le minimum de maintenance), dont le bassin est situé à une hauteur de 25 m des points de tirage, la pression aux robinets est de 2,5 bar (0,1 bar par mètre de colonne d'eau).

Calcul du volume du vase d'expansion

Considérons une installation où le champ de capteurs est situé en surtoiture, et l'échangeur dans le sous-sol de la maison. La différence de hauteur entre le point le plus bas et le point le plus haut est de 9 m.

Le remplissage se faisant principalement par le bas, nous appliquons une pression de 2,5 bar (lue au pressostat intégré à la station solaire). En haut des capteurs, nous aurons une pression de 2,5 – 0,9 = 1,6 bar.

Les liaisons entre le champ de capteurs et le stockage sont réalisées en inox annelé de 16 mm de diamètre, sur une longueur totale de 20 m (9 m aller, 9 m retour et 2 m de liaisons diverses).

Pour déterminer le volume du vase d'expansion, nous allons utiliser cette formule :

$Vv = ((Vs + Va + (Nc \times Vc)) \times (Ps + 1)) / (Ps - Pv)$, dont la signification des différentes variables est donnée ci-après.

- Vs est le volume d'eau de sécurité : $Vs = Vt \times 0{,}02$ avec un minimum de 2 l. Vt est le volume total de l'installation.
- Va est le volume d'augmentation à la montée en température (dilatation) : $Va = Vt \times Cd$.
- Cd est le coefficient de dilatation du fluide caloporteur (voir encadré).

Dilatation du fluide caloporteur

Pour l'eau et à une température de stagnation de 150 °C, le coefficient à appliquer est de 0,0905. Cependant, le coefficient est fonction du type d'antigel et du dosage. Il est possible, pour avoir une approximation, de majorer le coefficient de l'eau de 30 %. En cas de doute, il faut se référer à la notice du fabricant. Nous prendrons donc Cd = 1,3.

- Nc est le nombre de capteurs.
- Vc est le volume d'un capteur (pour le connaître, on se réfère à son avis technique – voir figure 3.23).
- Ps est la surpression finale en bars : Ps correspond à la pression de la soupape de sécurité (en station solaire, elle est généralement tarée en usine à 6 bar) moins 0,5 bar.
- Pv correspond à la pression du vase d'expansion : $Pv = HM \times 0{,}1$ + pression au point le plus bas de l'installation.
- HM est la hauteur manométrique.

1.1 Description succincte

Capteur solaire plan à circulation de liquide constitué :

- d'un absorbeur, avec tubes cuivre soudés par ultrasons sur une feuille en tôle de cuivre recouverte d'un revêtement sélectif,
- d'un coffre en tôle aluminium, isolé sur le fond par de la laine de roche,
- d'une couverture transparente en verre trempé.

Caractéristiques :

- Superficie hors tout (m^2) : 2,12
- Superficie d'entrée (m^2) : 1,88
- Pression de service (bars) : 9
- Poids à vide (kg) : 39
- Contenance en eau de l'absorbeur (litres) : 1,4
- Dimensions hors tout L x l x ép (m) : 2,039 x 1,039 x 0,91

Figure 3.23
Exemple d'avis technique d'un capteur (capteur solaire FK 7200, GREENone TEC Solar-Industrie GmbH).

Application

Cas d'un chauffe-eau solaire de 300 l avec un champ de deux capteurs solaires de 2 m² environ et une longueur de liaison entre le champ de capteurs et le stockage de 9 m.

▶ Calcul du volume d'eau de sécurité

$Vs = Vt \times 0{,}02$

La première variable à trouver est Vt (volume total de l'installation). C'est la somme des volumes des liaisons, de la capacité interne des capteurs et de l'échangeur.

La surface de chauffe (surface du serpentin) pour un ballon de 300 l est généralement de 1,4 m². Le diamètre moyen du serpentin étant d'environ 2 cm, le volume interne de ce serpentin peut être estimé à :

$V_{serpentin} = (D \times S) / 4 = (0{,}02 \times 1{,}4) / 4 = 0{,}007$, soit 7 l.

Le volume des liaisons peut être estimé à :

$V_{liaisons}$ = (Pi × 100 × 0,0016²) / 4 × 20 m = 0,004, soit 4 l.

Le volume du capteur est de 1,4 l. Nous avons deux capteurs dans cet exemple.

Le volume total est 1,4 + 1,4 + 7 + 4, soit 14 l environ.

Vs = Vt × 0,02 = 14 × 0,2 = 0,3

Vs étant inférieur à 2 par le calcul, on donne la valeur minimale : Vs = 2.

▶ Calcul du volume d'augmentation à la montée en température

Va = Vt × Cd

Nous supposons que l'ensemble de l'installation, sauf les capteurs, atteint une température maximale de 60 °C, et que la température en stagnation des capteurs est au maximum de 150 °C.

Ainsi :

Va1 = (15 – 2,8) × 0,017 × 1,3 = 0,28 l

Va2 = (2,8) × 0,0905 × 1,3 = 0,33 l

Va = Va1 + Va2 = 0,28 + 0,33 = 0,61

▶ Calcul de la pression finale

Ps = pression de sécurité – 0,5 bar = 5,5 bar

▶ Calcul de la pression au vase d'expansion

Dans cet exemple, la hauteur de la colonne d'eau est de 9 m.

Pv = HM × 0,1 + 1,6 = 0,9 + 1,6 = 2,5 bar

En réalité, nous appliquerons presque systématiquement une pression de 2,5 bar en bas d'installation (où se trouve le vase d'expansion), car les vases sont souvent chargés à 2,5 bar. Nous appliquons une pression légèrement supérieure pour « décoller » la membrane du vase, puis nous revenons à 2,5 bar.

3 Dans un vase d'expansion, le volume utile n'est pas égal au volume extérieur du vase (voir figure 3.20, p. 46).

▶ Calcul du volume du vase d'expansion

Vv = ((Vs + Va + (Nc × Vc)) × (Ps + 1)) / (Ps – Pv)

Vv = ((2 + 0,61 + (2 x 1,4)) × (5,5 + 1)) / (5,5 – 2,5)

Vv = 11,7 l, soit 12 l environ

Ainsi, nous choisirons un volume immédiatement supérieur à 12 l dans un catalogue de fabricant.

Circuit secondaire

Lorsque la température du ballon d'eau chaude sanitaire augmente, l'eau qu'il contient se dilate, alors que le ballon lui-même ne se dilate que de façon négligeable.

Sur la courbe de la figure 3.24 proposée ci-dessous, on voit qu'entre 20 et 65 °C la dilatation de l'eau représente 2 % en volume. Cela signifie que, tous les jours, un ballon d'eau chaude sanitaire de 400 l doit perdre 8 l d'eau. Le groupe de sécurité doit permettre cette évacuation, ce qui correspond à un gaspillage de 3 m³ en une année.

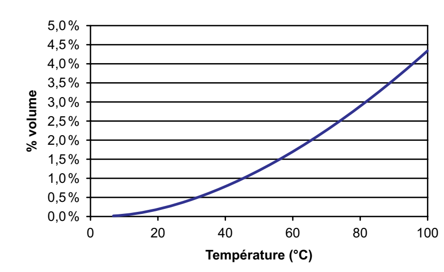


Figure 3.24
Coefficient de dilatation de l'eau

Il faut également noter que, si l'eau est calcaire, le groupe s'entartre souvent et des dysfonctionnements surviennent, pouvant induire des fuites permanentes. Placer un vase d'expansion en parallèle du groupe de sécurité est une opération simple, et qui s'avère rentable à très court terme.

Le volume utile du vase d'expansion doit donc être de 3 % du volume d'eau chaude sanitaire (pour couvrir une chauffe jusqu'à 80 °C), soit un volume nominal au moins double[3] : pour 400 l d'eau chaude sanitaire, le vase doit avoir une capacité nominale de 24 l.

Le vase doit être placé sur l'entrée d'eau froide et être « prégonflé » à la pression du réseau (3 à 4 bar).

La purge d'air au remplissage

Placer un purgeur automatique en point haut d'une installation de chauffage permet d'évacuer l'air contenu dans le fluide caloporteur (eau, mélange eau et glycol, etc.) au remplissage. De minuscules bulles d'air sont en effet contenues dans le fluide caloporteur au remplissage, ce phénomène étant amplifié par l'utilisation de pompes manuelles (à épreuve) ou automatiques.

Lors de la mise en pression du circuit, au moment de la fermeture des vannes de remplissage, il y a donc de l'air contenu dans le circuit.

Dans les installations de chauffage central classiques, le purgeur automatique, situé généralement au point le plus haut et systématiquement à la verticale de la remontée, permet d'évacuer l'air résiduel pendant les premiers jours de fonctionnement. Mais avec ces installations, le fluide caloporteur ne monte jamais en température jusqu'à atteindre un point de vaporisation (la température maximale se situe autour de 80 °C).

Dans une installation solaire, les conditions sont totalement différentes. Comme nous l'avons vu, la température du fluide solaire d'un capteur en stagnation (lorsque l'eau ne circule pas dans les capteurs) peut atteindre de 150 °C (capteurs plans) à

250 °C (capteurs à tubes sous vide). Même si une augmentation de la pression permet de retarder le point de vaporisation du fluide, celui-ci peut être atteint. Dans ce cas, si un purgeur automatique est en service (souvent au point le plus haut de l'installation, immédiatement avant le champ de capteurs, ou, pire, après), une partie du fluide s'échappe de l'installation sous forme de vapeur. Pourtant, ni le vase d'expansion ni la soupape de sécurité du groupe pompe solaire ne se sont déclenchés, ce qui indique que les pressions limites n'ont pas été atteintes. Ce rejet d'un peu de fluide solaire dans l'atmosphère se traduit, lors de la retombée en température, par une baisse de pression dans le circuit solaire. Il devra être rechargé (si on s'aperçoit de cette perte).

Aussi la solution du purgeur manuel de type vis pointeau de radiateur de chauffage central doit être préférée à celle du purgeur automatique. Au moment du remplissage du circuit, l'air contenu dans la canalisation sera évacué manuellement par l'opérateur effectuant le remplissage, et la vis sera ensuite maintenue fermée. La montée en température éventuelle à proximité du champ de capteurs ne portera pas préjudice au purgeur manuel car l'étanchéité est faite par contrainte de métal, sans matériaux fragiles.

Si la solution du purgeur automatique doit être envisagée, en cas de difficulté d'accès pour les utilisateurs par exemple, il est impératif de placer une vanne à boisseau sphérique entre le circuit et le purgeur automatique : une fois le circuit rempli et purgé de l'air, la vanne sera maintenue définitivement fermée. Ceci permet ensuite d'enlever le purgeur automatique, inutile pour l'application. L'intérêt est également de fiabiliser l'installation car le purgeur automatique ne supporte que des températures basses (pour des champs de capteurs), 110 à 140 °C au plus.

Stocker la chaleur

Dans toutes les installations, les calories captées sont stockées soit directement dans le lieu d'utilisation, soit dans un tampon intermédiaire. La nature et le dimensionnement de ce stock ont une forte influence sur le rendement du système.

Ordres de grandeur

L'eau chaude produite par une installation solaire peut être utilisée directement par un plancher chauffant (mais il faudra tout de même utiliser ces calories l'été) ou stockée dans une réserve plus ou moins grande. Une telle réserve permet de différer la consommation des calories par rapport à leur production.

Si un stock est prévu, il peut comprendre plusieurs échangeurs :

- un échangeur pour réchauffer le stock (calories en provenance des panneaux), et éventuellement un second échangeur lié à une source de chaleur auxiliaire ;
- un échangeur pour produire l'eau chaude sanitaire (il s'agit souvent d'un ballon baignant dans le haut du stock) ;
- un échangeur pour le chauffage.

On admet communément qu'il faut disposer de 80 l de stock par mètre carré de capteur. Il s'agit de la quantité d'eau dont il faut disposer pour stocker la production journalière du capteur, environ 2 kWh/m^2, avec un écart de température de 20 °C.

Dans le cas d'un plancher chauffant en béton, il faut prendre en compte la capacité calorifique du béton : elle est quatre fois plus faible que celle de l'eau, mais la densité du béton est deux fois supérieure. 160 l de béton ont donc la même capacité de stockage que 80 l d'eau. Il est toutefois préférable de ne pas avoir de variations de température de 20 °C au niveau de la dalle, mais plutôt 2 °C ; on compte donc environ 1,5 m^3 de béton par mètre carré de capteur.

L'échangeur en cuivre idéal d'un stock tampon doit avoir une surface comprise entre 20 et 30 % de celle des capteurs. Dans l'exemple précédent, nous avions 13,5 m^2 de capteurs, l'échangeur doit donc mesurer aux alentours de 3,3 m^2. S'il est constitué d'un serpentin de cuivre de 20 mm de diamètre, il doit mesurer 50 m de long (longueur = surface / $\pi \times$ diamètre).

Le ballon d'eau chaude sanitaire solaire

Le stockage est la première chose à penser lorsque l'on étudie la conception d'un circuit solaire, et ce avant même de définir quel capteur ou quel régulateur utiliser, quelles orientations seront optimales, comment les capteurs s'intégreront au bâtiment, etc.

Plusieurs questions se posent d'emblée pour le choix du ballon. Il s'agit, entre autres, de décider si on va supprimer le chauffe-eau en place et le remplacer par un préparateur solaire, si on doit prévoir un petit ou un gros volume, de définir quelle sera l'énergie d'appoint lorsqu'il n'y aura pas de soleil, etc.

S'équiper contre le calcaire

Le calcaire est la cause principale de la mise au rebut des préparateurs d'eau chaude sanitaire. Avant d'entamer l'étude de l'installation d'un chauffe-eau solaire, nous suggérons d'installer, après l'arrivée générale d'eau dans la maison, un filtre à particules couplé à un neutralisateur de calcaire de type polyphosphate.

Cette opération permet en outre de faire ses premiers pas en plomberie. Des kits prêts à l'emploi sont vendus dans les grandes surfaces de bricolage.



Figure 4.1
Ballon d'eau chaude sanitaire de 600 l.

Une solution à éviter : le ballon unique

Le « mélange » des énergies dans un seul ballon est à éviter absolument, pour plusieurs raisons.

Supposons que l'échangeur solaire soit placé en bas de ballon et la résistance électrique d'appoint (ou le deuxième serpentin pour le raccordement à une chaudière de chauffage central) à mi-hauteur du ballon. Comment va se comporter le cumulus solaire ?

Nous sommes à la fin de l'hiver, le soleil n'est plus présent depuis plusieurs jours. Le circuit d'eau chaude sanitaire fonctionne sur la résistance électrique, sur la moitié haute du cumulus (soit à 50 % du volume). L'utilisateur est donc obligé de restreindre sa consommation car il ne peut utiliser que la moitié du volume installé.

La résistance fonctionne la nuit (tarif jour/nuit d'EDF) pour chauffer l'eau chaude. Malgré la stratification des couches d'eau dans le ballon, qui permet de séparer l'eau chaude de l'eau froide, un phénomène de convection naturelle fait que, le matin, une partie de l'eau « froide » du bas de ballon est tiède. En outre, même si le ballon est équipé d'un brise-jet efficace à l'entrée d'eau froide, les tirages successifs ont un peu mélangé l'eau chaude et l'eau froide. Enfin, si, le matin, une journée ensoleillée s'annonce, une partie de l'énergie solaire ne sera pas exploitée puisque le ballon est déjà tiède dans la partie à chauffer par le soleil.

Cette solution de ballon unique ne doit donc être retenue que dans le cas où l'on ne peut faire autrement, pour cause de manque de place par exemple.

Le système optimal : préchauffage de l'eau chaude sanitaire

La meilleure solution est d'installer un préparateur de préchauffage de l'eau chaude sanitaire. Le cumulus existant est conservé (ou remplacé par un plus petit si ce dernier est hors d'usage, trop vieux, corrodé ou mangé par le calcaire). En amont de ce cumulus, un deuxième cumulus, seulement solaire, est installé pour préchauffer l'eau qui entrera dans le ballon traditionnel.

En cas d'absence de soleil, l'eau froide ne fera que transiter par le ballon solaire, et en sortira à la même température qu'en entrant. Cette eau sera alors chauffée de façon traditionnelle par le ballon classique. Si par contre le temps est ensoleillé, le préparateur solaire chauffera autant que possible l'eau en transit. En période estivale, le préparateur étant capable de répondre à l'ensemble des besoins, on pourra shunter le ballon d'appoint ou l'utiliser comme réserve supplémentaire de stockage.

Il existe un deuxième argument en faveur de la solution du préparateur de préchauffage : les échanges thermiques sont plus efficaces lorsque les écarts de température sont élevés.

Le chauffage de l'eau chaude sanitaire située dans le ballon solaire se fait, nous l'avons vu, par l'intermédiaire d'un



Figure 4.2
Ballon électrique de 150 l (en haut) couplé à un ballon de préchauffage solaire de 400 l (en bas).

serpentin situé dans le ballon et dans lequel circule le fluide solaire. Lorsque l'eau à chauffer est froide ou très froide (10 °C) et que la température du circuit solaire est relativement chaude (50 °C), la transmission de chaleur du fluide solaire vers l'eau chaude sanitaire est importante.

Par contre, plus la température de l'eau chaude sanitaire s'accroît, moins la transmission de chaleur est efficace. Au cours d'une journée ensoleillée de février, par exemple, la température de l'eau chaude sanitaire peut monter de 20 °C en deux heures seulement sur un ballon de 400 l, ce qui est efficace. Mais, si la température de l'eau a mis deux heures pour monter de 10 à 30 °C, elle peut mettre ensuite deux jours pour gagner 20 °C supplémentaires. En effet, en circulation, un jour de février et sur quelques mètres carrés de capteurs, le fluide solaire n'atteint que difficilement 50 °C : le rendement de l'échangeur et celui des panneaux diminuant au fur et à mesure que la température augmente, la température limite ne sera atteinte qu'au bout d'un temps infini.

Nous préférerons donc un système de préparation d'eau chaude sanitaire à un système combiné tout en un. Il n'est pas nécessaire d'attendre que le chauffe-eau déjà en place soit hors d'usage pour le remplacer par un préparateur solaire : un système de préparation d'eau chaude sanitaire peut être couplé directement à une chaudière gaz ou fioul en raccordant la sortie d'eau chaude du ballon solaire à l'entrée d'eau froide de la chaudière. La chaudière produira alors en continu de l'eau chaude, en ne consommant du carburant que pour élever l'eau chaude sanitaire à la température nécessaire.

Avantage supplémentaire : aucune interruption de service n'est à envisager. La mise en place du préparateur solaire peut se faire tranquillement, sans jamais manquer d'eau chaude : pendant l'installation (et après), c'est le préparateur classique qui travaille. Les dérivations sont effectuées au moment opportun, sans occasionner de longues coupures.

Le choix du volume de stockage « solaire »

Le volume de stockage pose également question : doit-on prendre un petit ou un gros ballon ? Si on ne démonte pas le ballon en place, a-t-on besoin d'un stockage « solaire » important ?

La réponse est simple : le volume du stockage solaire ne doit pas répondre à une consommation journalière, mais à un besoin d'autonomie. Plus le volume du ballon est important, plus longtemps on peut alimenter le ballon d'appoint en eau préchauffée.

Exemple (volontairement disproportionné)

La consommation journalière est de 50 l, par cinq tirages de 10 l, avec un intervalle d'une heure entre chaque tirage.

On va donc prendre un ballon électrique d'appoint au solaire de 10 l. Quant au ballon solaire, on va le choisir de 1 000 l : le ballon solaire va mettre longtemps pour monter en température mais, une fois chargé, la consommation journalière de 50 l sera quasiment remplacée tous les jours par le soleil s'il y en a, et, surtout, en cas d'absence de soleil, une autonomie de 20 jours est assurée.

L'exemple donné dans l'encadré ci-dessus est un peu hors norme, mais il illustre l'intérêt d'avoir un appoint qui soit le plus petit possible (correspondant au besoin journalier, sans plus), et un stockage solaire qui soit le plus gros possible. Cependant, il faut être raisonnable et prendre en compte l'aspect pratique ainsi que l'encombrement : au-delà de 400 l, la manipulation du ballon devient difficile.

Un ballon solaire de 400 l correspond à un usage moyen modéré. Couplé à un ballon d'appoint de 200 l, il permet de répondre aux besoins d'une famille de quatre à cinq personnes durant l'hiver, et de six à dix personnes durant l'été.

Ainsi, si l'on reprend les besoins présentés dans l'encadré, on choisira de coupler un ballon solaire de 400 l à un ballon électrique existant de 200 l ou à l'alimentation en eau froide de la chaudière à production d'eau chaude sanitaire. Ce ballon sera placé au plus près du système d'appoint, si possible immédiatement en dessous ou à côté (les ballons solaires étant souvent posés sur le sol et les ballons classiques accrochés au mur, ils peuvent parfois être placés l'un au-dessous de l'autre). Le ballon solaire n'a pas besoin d'être équipé de chauffage d'appoint.

Le stock de chauffage

Évaluer l'apport solaire

On entend souvent qu'un champ de capteurs solaires correspondant à 10 % de la surface à chauffer permet de satisfaire aux besoins de chauffage partiels d'une habitation. Mais, comme nous allons le voir, le champ de capteurs n'est qu'une petite partie des facteurs entrant en compte.

Au chapitre *Définir ses besoins de chauffage* (voir p. 2), pour une maison récente, correctement isolée, d'une surface habitable de 100 m², et située dans le Loiret, nous avons calculé un besoin de chauffage d'environ 13 600 kWh par an. Ce besoin n'est pas à prendre en compte sur l'année : il correspond uniquement à la saison de chauffe, estimée habituellement à 232 jours. L'énergie moyenne nécessaire au chauffage de cette maison est donc de

13 600 / 232 = 58 kWh par jour – soit, pour simplifier, environ 60 kWh par jour.

Si nous souhaitons une autonomie à 100 % du solaire, il faut donc pouvoir stocker 60 kWh par jour dans un ballon. Ce stockage, effectué durant la journée, est restitué durant la nuit ou hors période ensoleillée. Nous allons donc tenter de dimensionner notre ballon pour recevoir les 60 kWh par jour.

Premier cas : chauffage par radiateurs basse température (45 °C)

Avec un chauffage à basse température par radiateurs, le circuit chaud allant vers les radiateurs est à environ 45 °C. Considérons que le ballon de stockage accumule l'énergie en élevant la température de la masse d'eau de 15 °C pour avoir une quantité suffisante d'énergie stockée (la température maximale est alors de 60 °C, ce qui reste raisonnable en termes de rendement).

Nous avons donc 15 °C de « réserve de température », avec un besoin d'énergie de 60 kWh. Sachant que E = V (en m^3) × 1,16 × DT, nous avons V = 60 kWh / (1,16 × 15) = 3 400 l. Il faudrait donc 3,4 m^3 d'eau morte pour satisfaire aux besoins en chauffage de cette maison « standard » avec une autonomie à 100 % en solaire.

Si, pour des raisons pratiques, on doit se contenter d'un stock de 1 m^3, on ne saura avoir que 1 m^3 × 1,16 × 15, soit 18 kWh environ de réserve, soit 30 % des besoins de chauffage.

Il est de toute façon illusoire de penser chauffer plus ce stock (en tout cas de façon significative), car le rendement des capteurs diminue lorsque la température augmente. Il faut donc retenir un principe fondamental : un stock largement dimensionné (et bien isolé) constitue une caractéristique essentielle d'une installation de chauffage, autant que la surface de capteurs.

Avec un ensoleillement moyen récupéré sur une surface orientée convenablement, l'apport énergétique estimé en période hivernale se situe entre 1,5 et 2 kWh/m^2 par jour (suivant la localisation). Il faut donc de 8,5 à 11 m^2 de capteurs pour couvrir 30 % des besoins de chauffage. Cela correspond effectivement à 10 % environ de la surface de la maison de 100 m^2 que nous avons pris pour exemple.

Second cas : chauffage par plancher chauffant basse température (35 °C)

Avec un chauffage à basse température par plancher chauffant (ou mur chauffant), le circuit chaud allant vers le plancher sera à une température d'environ 35 °C. Comme dans le cas précédent, considérons que le ballon de stockage est capable de monter à 60 °C ; on a donc une capacité de stockage de 25 °C, contre 15 °C précédemment.

Toujours avec un besoin d'énergie de 60 kWh par jour, le volume nécessaire pour une couverture à 100 % est alors Q = 60 kWh / (1,16 × 25) = 2 000 l.

En se limitant à un stock de 1 m^3, on ne saura conserver que 1 × 1,16 × 25 = 29 kWh, soit 50 % environ des besoins de chauffage.

La surface du champ de capteurs peut ensuite être calculée à partir de l'estimation proposée, 29 kWh par jour. Entre 15 et 20 m^2 de capteurs sont donc nécessaires pour couvrir 50 % des besoins de chauffage.

Plancher solaire direct

Une autre façon de profiter du soleil est de réaliser une maison incluant une dalle de plancher chauffant épaisse (ou un mur chauffant). L'idée est de trouver ainsi une masse assez importante, toujours présente et non gênante, pour stocker la chaleur. Cette dalle, appelée plancher solaire direct (PSD), permet de stocker les calories durant une partie de l'année.

Le plancher accumule l'énergie sous forme de chaleur. Sa température maximale de confort, en fin de journée de stockage, est estimée à environ 30 °C. Le lendemain matin, la température ne doit pas être en dessous de 25 °C pour continuer de rayonner.



Figure 4.3
Mur chauffant en cours de réalisation.

Quelle est l'énergie pouvant être stockée dans une dalle de 20 cm d'épaisseur sur une surface de 100 m² ? Comme nous l'avons vu, la capacité de stockage du béton est évaluée à la moitié de celle de l'eau (chaleur massique divisée par 4, mais densité multipliée par 2 par rapport à l'eau). L'apport énergétique pour une variation de température de 2,5 °C est donc le suivant :

E = 20 m^3 × ½ × 1,16 × 2,5 °C = 30 kWh, soit 50 % du besoin journalier.

Une dalle de 30 cm d'épaisseur procure à l'utilisateur un confort accru car nous pourrons n'avoir qu'une chute de 2 °C pour une même énergie totale dissipée. Ou bien

nous pourrons conserver la chute de 2,5 °C mais, dans ce cas, la quantité d'énergie pouvant être accumulée serait de 45 kWh.

Il faut maintenant évaluer la surface de capteurs nécessaire pour récupérer les 30 kWh journaliers devant être dissipés dans la dalle.

Avec une dalle de 20 cm, et les mêmes chiffres que précédemment, il faudra entre 15 et 20 m² pour satisfaire 50 % des besoins de chauffage de la maison en période hivernale. Toujours en hiver, avec une dalle de 30 cm, il est possible de stocker l'énergie de 23 à 30 m² de capteurs, ce qui permet de satisfaire 80 % des besoins de chauffage.

Synthèse

Nous venons de présenter trois installations différentes par leur capacité de stockage (chauffage par radiateurs basse température, par plancher chauffant basse température et plancher solaire direct), et, pour chacune d'elles, nous avons proposé une surface optimale de capteurs.

Voyons à présent, à surface constante de capteurs (20 m²), l'énergie produite en une journée de fonctionnement. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Cela montre encore que le solaire est plus efficace lorsque la température du système est basse. Le système PSD est quasiment deux fois plus efficace que le système avec radiateurs ; il sera donc rentabilisé deux fois plus vite.

Rendement en fonction des différents stockages pour 20 m² de capteur

Type d'installation	Température matin (en °C)	Énergie captée (en kWh)	Température soir (en °C)
Radiateurs + stock 1 m³	45	18	60
Basse température + stock 1 m³	35	22	54
PSD 10 m³	25	32	28

À retenir

Les moyens de stockage de la chaleur sont un paramètre important du dimensionnement de l'installation. Comme nous l'avons vu, ils sont souvent définis par des contraintes : installation existante, manque de place, etc.

C'est en fonction des moyens de stockage que la surface de capteurs à utiliser est déterminée. Rappelons qu'il est inutile de surdimensionner cette surface :

- sur des systèmes à stock intermédiaire, la limite est celle du rendement des capteurs (leur température maximale est liée à la température extérieure) ;
- sur les systèmes PSD, le surdimensionnement provoque de l'inconfort (dalle trop chaude).

Dans tous les cas, il faut savoir que faire des calories durant l'été.

Contrôler la chaleur

La régulation est bien sûr un élément important d'une installation solaire. Les moyens de mesure couramment utilisés ainsi que les différents organes de commande sont également abordés dans ce chapitre.

Principe de la régulation

Pour qu'un chauffe-eau solaire fonctionne, il faut que la pompe se mette en route lorsque le fluide dans les capteurs est assez chaud, et qu'elle s'arrête lorsque le fluide est trop froid. Le principe est donc simple, reste à définir ce que l'on entend par « assez chaud » et par « trop froid ».

Pour que le système soit efficace, la pompe ne doit faire circuler le fluide que s'il est plus chaud en entrant dans le stock qu'en sortant. C'est donc l'écart de température entre le stock et le panneau qui importe. Nous l'avons vu, cet écart de température est appelé différence de température (DT).

Figure 5.1
Rôle de la circulation dans un montage de base. Ts : température stock, Tc : température capteur.

Régulation de base

Une régulation de base comprend deux entrées de température, une pour le stock (notée Ts sur la figure 5.1), une pour le capteur (Tc), et une sortie (le plus souvent à relais ou à « contact sec ») permettant de commander la pompe. Lorsque la différence de température est suffisamment importante (de l'ordre de 10 °C), le relais se ferme et la pompe est mise en route. En fin de journée, le panneau reçoit moins d'énergie : l'écart de température entre l'entrée du panneau et la sortie diminue et la régulation stoppe la pompe (pour une différence de température de l'ordre de 3 °C).

Il est donc important de mesurer correctement la température pour que le système fonctionne efficacement. Nous allons voir à présent où placer les sondes[1].

La sonde du ballon

La sonde du ballon doit être placée dans la partie basse du ballon, soit en contact direct avec le contenu, soit à l'intérieur de l'échangeur (donc en contact avec le fluide circulant dans les capteurs).

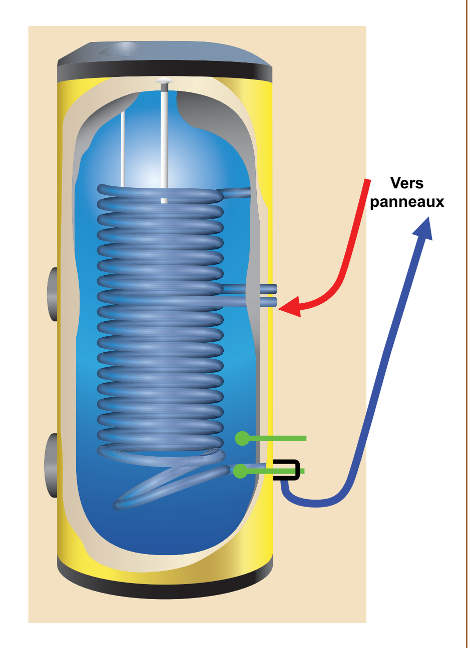


Figure 5.2
Vue éclatée d'un préparateur solaire avec positions possibles de la sonde de température (en vert).

Lorsque la pompe est à l'arrêt, les deux solutions donnent la même température. Lorsqu'elle est en marche, la température du fluide qui entre effectivement dans le

1 Dans *Les différents types de régulation*, p. 59, nous verrons quel type de sonde utiliser en fonction du type de régulation.

panneau est supérieure à celle de l'eau contenue dans le bas du ballon si l'échangeur n'est pas suffisamment efficace pour céder toutes ses calories à l'eau chaude sanitaire (c'est le cas de figure le plus courant).

Même si la sonde en contact avec le fluide, soit la seconde solution, est théoriquement préférable (puisque dans ce cas les deux sondes sont en contact avec le fluide caloporteur), la première fonctionne parfaitement. Le gain de précision à attendre avec le second type d'implantation est faible.

Réglage des paramètres et protection contre la surchauffe

Comme nous l'avons vu, la régulation basique se base sur deux paramètres : la différence de température d'enclenchement de la pompe, et la différence de température d'arrêt (selon les modèles de régulation, ces paramètres sont réglables par des potentiomètres ou par des menus accessibles via un écran et un clavier « minimal »).

En général, les régulations simples disposent en plus d'une fonction de protection contre la surchauffe du ballon : lorsque le ballon atteint une température maximale donnée, la pompe s'arrête quelle que soit la différence de température avec les panneaux. .

Elles sont également programmées pour que la température des capteurs ne dépasse pas un certain seuil. En cas d'anomalie, si la température dans le capteur dépasse un maximum, la régulation est stoppée et ne reprend que lorsque la température est à nouveau inférieure à ce seuil. De cette façon, on évite la vaporisation d'une trop grande quantité de liquide caloporteur

La sonde des capteurs

La sonde des capteurs doit être placée en haut de ceux-ci, si possible près de la sortie de retour vers le stock. Elle est généralement en contact avec le fluide (cette solution est préférable), mais certains l'installent en contact avec l'absorbeur du panneau. Une dernière solution, mise en œuvre par certains constructeurs, consiste à implanter la sonde des capteurs de façon qu'elle mesure la température de l'air ambiant du panneau.

Régulations évoluées

Lorsque les régulations deviennent moins basiques, elles peuvent proposer de multiples options.

- **Protection contre le gel** : lorsque la température du capteur descend en dessous d'un seuil paramétrable (quelques degrés au-dessus de 0 °C), le circulateur est mis en fonction. Ainsi, en brassant le fluide du circuit primaire, on évite que le panneau gèle.
- **Gestion de l'énergie d'appoint** : cette option permet de gérer la mise en route d'une résistance d'appoint pour chauffer l'eau chaude sanitaire lorsqu'elle est trop froide (absence de soleil, surconsommation, etc.).
- **Programmations périodiques** : tout comme pour un réseau de chauffage classique (chauffage d'un cumulus électrique en heures creuses par exemple), il est possible de rendre certaines fonctionnalités périodiques et automatiques (températures de consigne jour/nuit, mode été/hiver, etc.).
- **Bouton « reset »** pour revenir aux réglages de base.

Bien d'autres fonctions sont possibles, telles que la gestion d'une boucle eau chaude sanitaire, le pilotage du chauffage pour les systèmes solaires combinés, la gestion d'une boucle de décharge, la gestion d'un deuxième champ de capteurs, la gestion d'un deuxième stock, etc.

À retenir

Comme le reste du circuit, la régulation doit être adaptée aux besoins. Si elle gère les entrées/sorties, et constitue à ce titre une des clefs du rendement de l'installation, elle ne pourra jamais compenser un mauvais dimensionnement. Par exemple, même si la régulation dispose d'un bouton « Vacances », l'absence de puisage de l'eau sanitaire en été dans une installation mal dimensionnée conduira à des problèmes : dégradation de la qualité du fluide du circuit primaire, fixation de tartre dans le ballon et dans les échangeurs, etc.

Les différentes sondes de température

Le choix d'une sonde de température dépend de plusieurs critères, le premier étant la régulation utilisée. La régulation impose en effet souvent un type de sonde particulier[2], auquel cas ce qui suit n'est donné que pour information.

Les différents types de sonde de température se différencient par la méthode de mesure (phénomène physique mesuré) et par le niveau de mise en forme du signal (transformation de la variation de température en tension) pour qu'il soit compris par la régulation.

Les capteurs résistifs sont les plus courants. Ils mettent à profit un matériau, par exemple le platine, dont la résistance électrique varie de façon connue en fonction de la température.

Les autres types de capteurs sont rassemblés sous le terme générique de capteurs silicium. Ils incluent, comme les capteurs résistifs, un matériau sensible à la

2 Voir *Les différents types de régulation*, p. 59.

température, mais aussi une électronique plus ou moins sophistiquée de mesure et de mise en forme du signal.

Les capteurs résistifs

Les capteurs résistifs les plus utilisés sont ceux à base de platine, dits PT100 ou PT1000. Les capteurs PT100 présentent une résistance de 100 Ω à 0 °C et voient leur résistance varier quasi linéairement (dans les domaines qui nous intéressent) de 0,38 Ω/°C. Les PT1000 font 1 000 Ω à 0 °C et varient de 3,8 Ω/°C.

Avantages

- Faible coût (de l'ordre de 2 €). Le coût dépend beaucoup de l'encapsulation du composant.
- Interchangeabilité : les tolérances des caractéristiques du capteur étant relativement faibles (0,5 %), il est possible de changer le composant par un autre du même type sans calibrer à nouveau l'ensemble du montage capteur, interface et régulation. Attention : s'il est possible de ne pas recalibrer, cela n'est pas vraiment conseillé…
- Simplicité de mise en œuvre : si le capteur et la régulation sont proches, deux fils de liaison suffisent pour les relier[3].
- Bonne résistance aux hautes températures.

Inconvénients

- Faible coefficient de température, ce qui nécessite une amplification importante du signal.
- Capteur de base sans aucune mise en forme du signal. Il faut donc une régulation qui accepte ce type de capteur ou une électronique séparée de mise en forme.

Comparaison entre les PT100 et les PT1000

Beaucoup de sondes propriétaires (fournies par le fabricant de la régulation) sont à base de PT100 ou de PT1000.

Entre PT100 et PT1000, il est globalement préférable de choisir les PT1000. Pour comprendre les différences entre les deux types de capteurs, il faut avoir à l'esprit que plus un capteur présente une forte résistance (résistance PT1000 = 10 × résistance PT100), plus il est sensible aux perturbations électromagnétiques, et moins la résistance du câble le reliant à la suite de l'électronique a d'importance – autrement dit, moins l'influence de la qualité de ce câble se fait sentir. Une PT100 doit donc être reliée à une carte interface située à proximité (carte monovoie installée près de la PT de mesure de température des panneaux par exemple). Inversement, la PT1000 peut être éloignée de cette carte (carte multivoie installée dans la chaufferie par exemple) ou de la régulation.

Les coûts de ces deux types de capteurs sont sensiblement les mêmes.

Les capteurs silicium

Les capteurs silicium intègrent sur une même puce un capteur de type KTY, des éléments de linéarisation, ainsi que les étages d'amplification, ce qui permet d'obtenir directement en sortie une tension (ou une intensité) proportionnelle à la température. Exemple de référence disponible sur le marché : LM35.

Avantages

- Intégration complète fournissant un signal a priori exploitable. Mais il existe beaucoup de composants différents avec des tensions de sortie différentes : tous les composants ne sont pas compatibles entre eux.
- Même si la sortie du composant n'est pas appropriée à une régulation particulière, son adaptation sera beaucoup plus simple que celle nécessaire avec une sonde platine.

Inconvénients

- Gamme de températures d'utilisation limitée par les caractéristiques du silicium (de – 50 à 125 °C). Il n'est donc pas pensable d'utiliser ce type de sonde dans les panneaux eux-mêmes, qui sont susceptibles de dépasser largement 125 °C.
- Nécessite trois fils au minimum.
- Tolérances « larges » des composants à faible coût. C'est pourquoi il est délicat d'interchanger deux capteurs de ce type sans recalibrage.

Les capteurs numériques

Il existe un autre type de capteur silicium : les capteurs numériques. Ils possèdent les mêmes composants que les capteurs silicium, mais sont équipés en plus de leur propre convertisseur analogique digital. Ils communiquent avec la régulation par un bus (de type série), et ne sont utilisables que pour des systèmes à base de PC ou de cartes spécifiques.

Exemple de référence : DS18B20 et DS1822 de Maxim/Dallas.

Combinaison de capteurs résistifs et de capteurs silicium

Sur une même installation, on peut panacher les différents types de capteurs à condition d'éviter de comparer des données issues de types différents (on évite ainsi les problèmes liés à la non-linéarité

3 Il existe des montages dits trois ou quatre fils. Ces fils supplémentaires permettent de prendre en compte la résistance du fil de câblage, ce qui augmente la précision des mesures. Si vous étalonnez les sondes une fois en place, ou si le câblage est court, la précision d'un montage à deux fils sera suffisante.

des capteurs). On peut par exemple utiliser des sondes PT pour mesurer les températures des capteurs solaires et du stock (il y aura comparaison directe de ces deux températures), et une sonde silicium pour la mesure de la température extérieure. Cette dernière, si elle est uniquement utilisée pour la fonction hors gel, fournit au système une donnée qui ne sera jamais comparée aux autres.

Les principaux actionneurs du circuit

Les principaux organes à commander sont les pompes, les électrovannes et les vannes multivoies. Ces composants sont le plus souvent alimentés en 230 V. Leur commande nécessite donc un relais en sortie de la régulation et, plus rarement (mais de plus en plus souvent), on trouve des sorties de puissance électronique (de type triac).

Les pompes

Il s'agit principalement de circulateurs de chauffage du commerce. Ils sont commandés en tout ou rien (TOR) : la pompe fonctionne ou ne fonctionne pas. La plupart disposent d'un sélecteur manuel trois positions permettant de moduler le débit.

Il est, en général, possible de remplacer ce sélecteur par un ou plusieurs relais permettant de commander la vitesse, en plus du marche/arrêt. Un ohmmètre et quelques connaissances en électrotechnique suffisent. Sachez toutefois que, si ce remplacement est possible, il n'est pas forcément nécessaire.

En revanche, il est impossible de moduler en continu la vitesse du moteur à l'aide d'un modulateur de lampe halogène. Le modulateur ne le supportera pas.

Les schémas de câblage interne des moteurs étant très variables d'une marque à l'autre, nous n'en montrerons pas ici.

Les vannes

Elles sont en général à trois ou quatre voies. Il en existe deux types : les vannes tout ou rien, dites à siège ou à soupape, et les vannes analogiques ou de mélange, dites à secteur.

Vannes à siège (deux et trois voies)

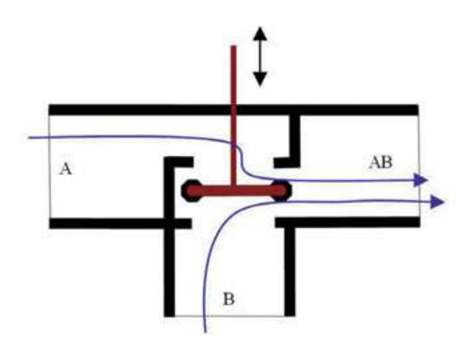


Figure 5.3
Vanne à siège.

Le principe de fonctionnement de ce type de vanne est illustré par la figure 5.3 : une tige commande la position d'une soupape qui bloque soit l'entrée A, soit l'entrée B. L'entrée peut aussi se faire par le côté AB, auquel cas la vanne distribue le flux soit vers A, soit vers B.

La tige est en général commandée par un ressort intégré à la vanne d'un côté, et par un moteur thermique de l'autre. Ce dernier est simplement composé d'une tige, en appui sur celle de la vanne, qui se dilate sous l'effet du passage d'un certain courant (de faible puissance, environ 3 W). La commande est donc de type tout ou rien : on chauffe ou on ne fait rien (et donc la tige refroidit). Un seul relais permet de commander cette vanne.

Cette commande de type tout ou rien n'implique pas que l'ouverture et la fermeture de la vanne sont instantanées : s'agissant d'un moteur thermique, le temps d'ouverture est plutôt de l'ordre de 3 à 5 min. On notera par ailleurs que, durant une courte période (de l'ordre de 1 min), les trois voies sont ouvertes en même temps.

Les électrovannes (deux et trois voies)

Les électrovannes sont identiques aux vannes à siège, mais le dispositif de commande est électromécanique (le principe est identique à celui d'un relais). En l'absence de courant dans la bobine, le retour à la position de repos est assuré par un ressort. Les électrovannes existent en version normalement ouverte (NO), c'est le modèle le plus répandu, ou en version normalement fermée (NF).

Cette technologie est simple et robuste, mais elle s'avère parfois difficile à trouver dans des diamètres de raccord compatibles avec les systèmes solaires.

Elle présente l'avantage d'un faible coût (entre 60 et 100 € l'unité), et permet une commutation entre positions ouverte et fermée quasi instantanée (< 0,1 s) – ceci constituant aussi un inconvénient, car des « coups de bélier » peuvent se produire.

Un autre inconvénient des électrovannes est que leur position de travail (fermée pour un modèle NO) nécessite un courant de maintien. La puissance alors consommée est de l'ordre de la dizaine de watts, soit trois fois plus que le moteur thermique de la vanne à siège.

Vannes à secteur (trois et quatre voies)

Dans ce type de vanne, une partie rotative (secteur) permet d'occulter une surface correspondant à un quart de cercle. Selon sa position, elle peut fermer l'une ou l'autre des entrées ou en mélanger

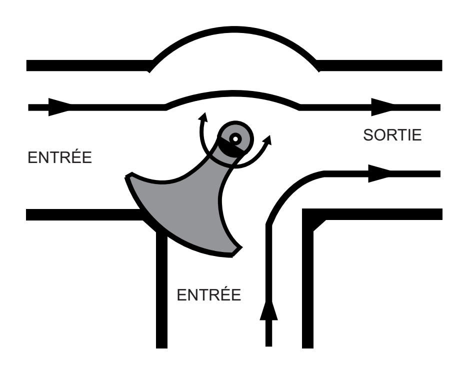


Figure 5.4
Vanne à secteur.

plus ou moins les contenus. Les vannes à secteur sont en particulier utilisées pour régler la température de circulation de l'eau dans les radiateurs.

Dans l'exemple proposé sur la figure 5.4, la commande principale est un moteur avec trois fils permettant de faire tourner le secteur dans un sens ou dans l'autre. Il faut donc deux relais pour commander la vanne, un pour mettre en marche le moteur, l'autre pour choisir le sens.

En général, deux fins de course sont intégrées au moteur (l'automate n'a pas à les gérer). Elles sont réglées de façon que, si on laisse tourner le moteur, celui-ci s'arrête lorsque le secteur occulte totalement l'une ou l'autre des entrées.

Le temps de passage d'une position à l'autre est de 3 à 5 min. Pour commander cette vanne en proportionnel (mélange des deux fluides d'entrée), on envoie des impulsions de tension sur l'un des deux fils pendant des durées de 10 à 30 s jusqu'à obtenir l'état souhaité.

Le moteur est de type servomoteur : intrinsèquement, sa vitesse de rotation est élevée. Un ensemble de pignons permet une réduction de celle-ci et donc un positionnement précis du secteur. Cela constitue autant un avantage qu'un inconvénient : d'une part, le temps de commutation est plus important, et, d'autre part, cet ensemble de pignons est relativement fragile.

Les différents types de régulation

Il existe quatre types de régulation proposant les fonctions basiques décrites ci-dessus, ainsi que quelques fonctions annexes.

Régulation analogique

Les régulations analogiques, comme les régulations numériques, sont des systèmes dédiés au solaire : elles ne font que cela, mais simplement. Exemples : Climel RD010 et RD012.



Figure 5.5
Régulation analogique (Climel).

Avantages

- Régulation la moins coûteuse.
- Simple à installer et à utiliser. Il y a deux sondes de température pour un chauffe-eau solaire, ou trois pour un système combiné chauffe-eau solaire + chauffage solaire.
- Fonctionne immédiatement.

Inconvénients

- Utilisation se limitant à de petites applications, type chauffe-eau solaire en préchauffage d'un ballon existant. Les possibilités de contrôle des paramètres de fonctionnement sont limitées, la commande de vannes multivoies est problématique, etc.
- Peu flexible, peu évolutive, aucune interface d'extension vers d'autres systèmes.

Régulation numérique préprogrammée

Il s'agit ici aussi de matériel dédié au solaire. Exemples : Suntana 2 et gamme TR de Steca, AS SR868C3E-1 (gestion chauffe-eau solaire) et AS SR618C1 (gestion chauffe-eau solaire, chauffage et le reste) du constructeur Chang Zhou Shuangri Electron.



Figure 5.6
Régulation numérique.

Avantages

- Simple d'installation et d'utilisation.
- Nombreuses possibilités de câblage et de gestion des périphériques (plans de capteurs, pompes, vannes et sondes).

Inconvénients

- Un peu plus chère.
- Possibilités offertes pouvant s'avérer insuffisantes pour l'application visée (dans des cas spécifiques) – et il peut être difficile d'anticiper ce type de problème.
- Fonctions des entrées/sorties parfois dédiées. Une entrée dédiée à la mesure de température, par exemple, ne pourra servir au comptage d'énergie.

Afin de réduire les coûts, certaines interfaces électroniques sont incluses à l'automate, ce qui impose le choix du type de capteur et de sonde de température. Certains trouveront qu'il s'agit là d'un avantage, d'autres d'un inconvénient.

Automate programmable industriel (API)

Ce sont des systèmes très ouverts, qui initialement ne sont pas conçus pour une application solaire. Exemples : Millenium II et Millenium III de Crouzet, Logo de Siemens, Zélio II de Télémécanique, Zen d'Omron.



Figure 5.7
API Crouzet utilisé dans le chantier d'Yves Guern, p. 102.

Avantages

- Programmable et extensible : quasiment aucune fonction n'est dédiée, que ce soit en entrée, en interne ou en sortie. Le système est flexible et évolutif, ce qui est particulièrement intéressant dans le cas de l'autoconstruction. Il peut être développé pas à pas, les erreurs corrigées, et l'efficacité de l'installation améliorée au fur et à mesure de l'appréciation de son comportement.
- Multiplicité de modèles disponibles (ce qui peut devenir un inconvénient), avec différentes options : nombre d'entrées/sorties, avec ou sans afficheur et clavier de commande, extensible ou non, sorties statiques ou équipées de relais, alimentation dédiée ou non, etc. Le choix d'une alimentation externe (24 V) correctement dimensionnée permet éventuellement d'alimenter les sondes de température le nécessitant.

Inconvénients

- Plus complexe et onéreux que les précédentes solutions.
- Nécessite la réalisation d'une interface électronique de mise en forme des signaux de sonde, ou l'achat des sondes du constructeur.
- Mise au point de la régulation requérant un minimum de compétences. Il ne s'agit pas de maîtriser un langage de programmation spécifique aux automaticiens, mais un langage graphique proche de la logique câblée et donc facilement assimilable.
- Capacité de traitement limitée. L'implémentation de toute fonction ampute la capacité de traitement restante, ce qui signifie qu'un compromis doit parfois être trouvé entre puissance de calcul de l'automate et fonctionnalités désirées.

Régulation à base de PC

Avantages

- Permet une maîtrise totale de la régulation.
- Aisément extensible.
- Peu coûteux : la puissance de calcul nécessaire étant faible, un vieux PC portable convient (même un 486 sous DOS).
- Possibilité d'affichage permanent et de sauvegarde de toutes les données de fonctionnement du système.

Inconvénients

- Réservé à des personnes maîtrisant la chaîne de développement (matériel et logiciel).
- Nécessite de maîtriser le routage de typons (planche photographique servant à graver un circuit en cuivre) et leur éventuelle fabrication.
- En cas de dysfonctionnement du PC, tout le système est bloqué. Or la fiabilité est un élément important à prendre en compte.

Carte spécifique

Ce type de solution présente les mêmes avantages que le PC. Il a aussi les mêmes inconvénients avec, en plus, la nécessité de développer la totalité du matériel du système et, côté logiciel, l'impossibilité de s'appuyer sur un système d'exploitation. Il est possible en revanche de gagner en fiabilité.

À retenir

Pour un simple chauffe-eau solaire, une régulation analogique ou numérique simple, d'entrée de gamme, est la meilleure solution. Pour un système plus complexe, on ira d'abord vers une régulation numérique préprogrammée plus ou moins complexe, puis vers un API (ou un PC si on en a les compétences ou le goût).

La programmation d'un API pour une installation solaire basique est présentée en annexe.

Les fonctions de production de la chaleur étant souvent séparées des fonctions de consommation, l'utilisation de deux régulations simples peut éventuellement constituer une bonne solution.

Dans tous les cas, la notion de fiabilité et de simplicité d'utilisation devrait conduire les choix. Nous pensons qu'il faudrait toujours avoir à l'esprit la question : « Suis-je capable (ou même est-ce nécessaire) d'expliquer le fonctionnement à des amis à qui je prête la maison ? »

Quelques conseils de câblage et de filtrage

La protection antifoudre

Les dégâts provoqués par la foudre concernent avant tout les équipements extérieurs – sauf si elle frappe directement la maison. Les câbles électriques externes (EDF, antennes, câbles de sondes, etc.), et, par conduction, tous les éléments connectés à ceux-ci (alimentation des équipements, régulation solaire, téléphone, téléviseur, etc.), ainsi que les éléments présentant une masse métallique extérieure importante (capteurs solaires, gâche électrique, interphone, etc.) sont autant de récepteurs privilégiés.

La foudre est un arc électrique dont les principales caractéristiques sont une intensité importante (plusieurs dizaines de milliers d'ampères), une tension induite très forte (quelques dizaines de milliers de volts), un temps d'exposition très faible et une fréquence totalement aléatoire – ce qui rend difficile son filtrage. Elle « cherche » le chemin le plus court pour rejoindre la terre.

> **À noter**
>
> Sachez que, si la foudre frappe directement les capteurs, tout sera détruit : capteur, sonde, câble, régulateur, circulateur, etc. C'est la raison pour laquelle il est important de déclarer l'installation à son assureur.

La protection de l'alimentation électrique des équipements

Une alimentation électrique comporte normalement un circuit la protégeant des surtensions, mais le dispositif utilisé est souvent rudimentaire. Pour une protection plus efficace, on peut utiliser des boîtiers parasurtenseurs installés sur le coffret électrique de l'alimentation maison ou sur un boîtier secondaire (pour ne protéger que la régulation solaire par exemple).

Le prix de ce dispositif dépend de la qualité du produit et de la puissance protégée. Il varie entre 30 et 1 000 €.

La protection des effets induits dans les câbles

Lorsque la foudre frappe à proximité des capteurs solaires (dans le jardin par exemple), le câble de la sonde mesurant leur température peut propager une tension induite à la régulation par le câble de liaison. Les circuits électroniques installés en aval, les circuits électroniques d'entrée de régulation et la carte interface entre la sonde et la régulation sont alors détruits.

Plusieurs dispositifs de protection sont possibles, sachant qu'ils doivent rester accessibles pour permettre un éventuel remplacement des composants.

On peut opter pour un dispositif en série avec le câble de liaison entre la sonde et la régulation, ou entre la carte interface et la régulation : c'est un fusible rapide de faible intensité de fusion (1 A) visant à limiter l'intensité du courant induit par la foudre.

Un dispositif en parallèle est également possible, à placer sur la connexion entre la sonde et la régulation. On peut utiliser une varistance ou une diode Transil.

- Une varistance (VDR, *volt dependant resistor*) est un composant électronique qui présente, en fonctionnement normal, une résistance très élevée et donc une interaction nulle avec le capteur de température. Si la tension à ses bornes augmente fortement (à cause de la foudre), sa résistance s'effondre et met en court-circuit l'entrée de la régulation, la protégeant de fait.
- Une diode Transil est une diode Zener, c'est-à-dire un composant électronique qui limite la tension à ses bornes afin d'éviter les surtensions. Pour l'utiliser en protection d'entrée d'une régulation, il faut choisir un modèle bidirectionnel si l'on ne connaît pas la polarité du signal présent. Le temps de commutation d'une diode Transil étant beaucoup plus faible que celui d'une varistance, la protection est accrue. En revanche,



Figure 5.8
Diode de protection antifoudre. La diode, recouverte de colle, est connectée en amont et en aval (par les deux parties vertes) aux capteurs et à la centrale. En cas de surtension, la diode crée un court-circuit.

comme tout composant électronique, la diode présente une intensité maximale au-delà de laquelle elle rend l'âme.

Capteurs avec ancrage métallique dans le sol

Si les capteurs solaires sont installés au sol avec un ancrage métallique, les protections antifoudre du câble de sonde peuvent être éventuellement minorées dans la mesure où la foudre trouve dans ce cas facilement son chemin à travers les panneaux solaires. Il s'agit là d'une possibilité, mais pas d'une recommandation…

La protection contre les perturbations électromagnétiques

Il faut éviter de faire courir les câbles reliant les sondes de température à la régulation aux abords d'éléments fortement perturbateurs (télévision, moteur électrique, etc.).

Les sorties pulsées

Certaines régulations disposent d'options permettant de générer des trains d'impulsions sur les sorties (ce procédé est appelé PWM, *pulse width modulation*). Ceci constitue un avantage lorsque les périphériques sont capables de les gérer et que cela offre un intérêt, mais devient un inconvénient lorsque ce n'est pas le cas et que l'installation ne fonctionne pas correctement sans raison apparente. Dans un premier temps, si la régulation comporte ce type de réglage, il faut veiller à ce que le rapport cyclique des impulsions soit ajusté à 100 %. La tension de sortie devient alors de type tout ou rien.

Section des câbles

Des sections importantes sont à privilégier (0,5 ou 1 mm², plutôt que 0,1 mm²), même si cela est plus onéreux, les liaisons devant être le plus courtes possible. Cela permet en particulier de minimiser l'influence de la résistance du câble sur celle de la sonde.

Prenons un exemple quelque peu caricatural. Avec une régulation analogique ou préprogrammée et des sondes autoconstruites, on veut rallonger les liaisons entre les sondes et la régulation par un câble de 100 m de long (soit 200 m au total pour l'aller et le retour) en 0,1 mm². La résistance de ce câble, de 34 Ω, vient s'ajouter dans le circuit à celle du capteur. Si une PT100 est utilisée (100 Ω à 0 °C, et 139 Ω à 100 °C), l'influence de ces 34 Ω ajoutés est telle que toutes les mesures sont fausses, décalées de plusieurs dizaines de degrés. Le même câble en 0,5 mm² présente une résistance de 7 Ω, diminuant d'autant son influence (pour le choix entre PT100 et PT1000, voir p. 57).

Résistance d'un conducteur

La résistance d'un conducteur est proportionnelle à sa longueur et inversement proportionnelle à sa section : $R = \rho \times L / S$, avec $\rho = 17 \times 10^{-3}$, L étant exprimé en mètres et S en millimètres carrés.

Le filtrage des données

Avec une régulation analogique ou préprogrammée, ce point peut être éludé puisque le filtrage des données est inclus dans la régulation.

La mesure de température par une sonde peut être fortement perturbée par des phénomènes non représentatifs de l'évolution réelle de la température (coups de chaud momentanés sur la sonde, parasites sur la sonde ou sur son câble de liaison, etc.). Ceci est important lorsque la mesure avoisine un seuil de déclenchement de la régulation : il se produit alors un phénomène d'oscillation, la mesure de température devenant légèrement supérieure au seuil, mais redescendant aussitôt, puis remontant, etc.

Il est donc nécessaire de filtrer les mesures afin d'éviter tout phénomène d'oscillation. Un tel filtrage évite en outre de modifier inutilement l'état des périphériques de sortie de la régulation (pompe et vannes) – car ces éléments, s'ils sont endurants, ont une durée de vie limitée par leur nombre de cycles de fonctionnement et de changement d'état.

Utilisation d'une carte interface

Si une carte interface entre le capteur et la régulation (incluse à une sonde industrielle ou autoconstruite) est utilisée, elle comporte en principe des filtres analogiques, mais ceux-ci ne sont pas forcément suffisants. Il faut donc filtrer les données à l'intérieur même de la régulation.

Plusieurs techniques sont possibles.

- Le trigger (avec API), dont le fonctionnement est identique à celui d'un thermostat : une entrée et deux seuils, un bas (x °C) et un haut (x + Δ °C). La pompe se met en marche pour une température de x + Δ °C, et ne s'arrête qu'en dessous de x °C (voir figure 5.9).
- Le calcul de la moyenne glissante (avec PC ou carte spécifique). On calcule la valeur moyenne des n derniers échantillons mesurés : $Vm = (V_t - V_{t-1} - \ldots - V_{t-n}) / (n + 1)$.

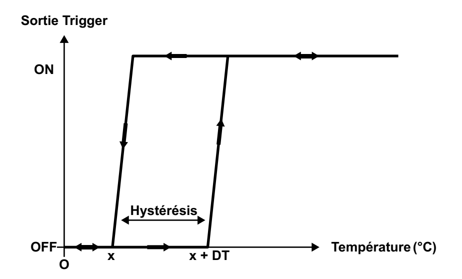


Figure 5.9
La courbe de réponse du trigger. L'hystérésis correspond à la différence de température.

- Une entrée filtrée (avec API) : les données d'entrée sont filtrées par un filtre numérique passe-bas (qui laisse passer les variations lentes du signal, l'équivalent d'un filtre analogique RC), ce qui a pour effet de ralentir les variations des données et donc de filtrer les pics de mesure.
- Lorsque la température est comparée à un seuil, un temporisateur placé en aval du comparateur retarde de quelques secondes le signal oscillant d'entrée. Ce dispositif élimine les oscillations en sortie du comparateur lorsque la température est très proche du seuil de comparaison[4].

Toutes ces fonctions peuvent être assumées par le logiciel d'un PC ou d'une carte spécifique.

Prendre le temps

Dans le solaire, lorsque l'on se lance dans le réglage d'un API, d'un PC ou d'une carte électronique de mise en forme des signaux, il faut avoir conscience que l'on n'est pas pressé. Au contraire, plus on filtre, mieux cela fonctionne : rien n'est à faire dans la minute. Il faut ainsi s'habituer à parler en centièmes d'hertz et en dizaines de minutes…

4 Dans *Les différents types de régulation*, p. 59, nous avons vu quel type de sonde utiliser en fonction du type de régulation.

Partie pratique : 5 exemples de réalisations

Cette partie est entièrement dédiée à des expériences pratiques, présentées par leurs concepteurs.

La première est celle de Pierre Amet, qui s'est lancé dans « l'aventure » dès 2000. Fort du succès de son auto-installation, il a créé un premier site Internet décrivant dans le détail sa réalisation ; l'association Apper a ensuite vu le jour sur Internet. Ces mises en ligne ont été un facteur déclenchant pour la plupart des autres expériences présentées ici.

L'ensemble de réalisations proposé dans les pages qui suivent couvre une large gamme de besoins et de solutions. Le lecteur pourra y trouver une source d'inspiration pour sa propre installation ou, plus simplement, une liste d'écueils à éviter.

Réalisation de Pierre Amet (Alpes-de-Haute-Provence) : 9 m^2 de capteurs plans, eau chaude sanitaire 300 l, appoint chauffage direct dans les radiateurs, régulation par automate programmable industriel.

Réalisation de Claude Mandrille (Alpes-de-Haute-Provence) : 25 m^2 de capteurs plans, eau chaude sanitaire 600 l, appoint chauffage direct dans les radiateurs, régulation simple du commerce.

Réalisation de Gabriel Gourdon (Loire-Atlantique) : 4,50 m^2 de capteurs à tubes sous vide, eau chaude sanitaire 300 l, chauffage par radiateurs, régulation du commerce.

Réalisation d'Yves Guern (Bouches-du-Rhône) : 18 m^2 de capteurs plans, ballon tampon de 1 500 l pour chauffage par radiateurs, eau chaude sanitaire séparée de 600 l, capteurs autovidangeables (drainback), régulation par automate programmable industriel.

Réalisation d'Emmanuel Marguet (Jura) : 30 m^2 de capteurs plans intégrés en toiture, ballon tampon de 1 200 l pour chauffage par plancher chauffant et eau chaude sanitaire instantanée, capteurs autovidangeables (drainback), régulation par PC.

Réalisation n° 1

par Pierre Amet

- 9 m² de capteurs plans
- Eau chaude sanitaire 300 l
- Appoint chauffage direct dans les radiateurs
- Régulation par automate programmable industriel





En 2001, nous venons d'acheter une maison ancienne (de 1920) à la montagne, à 960 m d'altitude, à Saint-André-les-Alpes dans le département des Alpes-de-Haute-Provence. Les murs sont en pierre du Verdon, non isolés. Après un hiver de chauffage, les conclusions sont sans appel : 3 000 l de fioul avec eau chaude sanitaire électrique (6 360 kWh/an). L'isolation extérieure ne me semble pas envisageable pour l'instant : c'est un changement notoire de l'esthétique des façades, et une solution coûteuse. Notre région étant la plus ensoleillée de l'Hexagone, je réfléchis dans ce sens et commence par construire une véranda attenante en façade sud. Elle apportera passivement de la chaleur durant la journée et isolera durant la nuit. Je décide aussi de faire un appoint solaire à la chaudière fioul. Immédiatement, des questions se posent.

Malgré mes recherches, je n'ai pas trouvé d'installateur qui puisse répondre à mes attentes. Les deux devis proposés dépassent mon budget et les technologies préconisées sont inappropriées à mes demandes (utilisation de l'appoint solaire en série sur le retour eau froide-chauffage, qui a pour effet de faire travailler les capteurs avec de mauvais rendements).

La France est l'un des pays européens les plus favorisés en termes d'ensoleillement, mais le taux d'équipement et les incitations de l'État restent à la traîne. L'indice du parc solaire installé pour 1 000 habitants en 2006 est ainsi de 18,5 m² en France, contre 343,4 m² en Autriche (18 fois plus) et 730,9 m² à Chypre (40 fois plus).

On peut faire le constat d'une certaine inadéquation de la législation française en matière de solaire : aujourd'hui, pour

Quelques mots sur l'autoconstructeur

Âge : 43 ans.

Formation : CAP Mécanicien ajusteur, BEP Mécanicien monteur, Bac F1 Mécanique, BTS Fabrication mécanique, Licence Génie mécanique.

Profession : professeur en génie mécanique (ce métier nécessite des compétences en mécanique mais aussi en automatisme et informatique industrielle).

Intérêts particuliers : le bricolage, le jardinage, l'apiculture, le planeur, le ski de randonnée, le taï ji quan, la randonnée pédestre.

Domaine de réticence au départ : l'électronique.

qu'une installation soit éligible aux aides, il est nécessaire qu'une personne qualifiée Qualisol l'installe. Ce cadre est donc désavantageux pour l'autoconstructeur, contrairement à ce qui se fait dans d'autres domaines ou dans d'autres pays. Par exemple, en électricité, le Comité national pour la sécurité des usagers de l'électricité (Consuel)[1] vérifie que l'installation répond à une norme ou à un cahier des charges précis et donne une attestation de conformité, que l'installation soit réalisée par un professionnel ou par vous-même. Autre exemple, en Suisse, les aides sont accordées pour les installations solaires, y compris dans le cadre d'autoconstruction ou d'auto-installation ; les règles de l'art doivent être appliquées et l'installation validée par un expert.

Je m'étais déjà aperçu de ces freins en 1999, quand j'avais voulu acquérir mon premier chauffe-eau solaire. Je m'étais alors tourné vers l'autoconstruction totale car l'offre des professionnels était encore trop restreinte sur le marché. En outre, les aides des collectivités territoriales ne profitaient pas aux intéressés mais à la filière du solaire thermique, et elles étaient une des causes des surcoûts des matériels (les aides induisant des renchérissements du matériel). La réalisation de ce chauffe-eau solaire m'a alors permis de me faire une expérience en plomberie. À basse température, je me suis aperçu que les installations solaires d'eau chaude sanitaire ou de chauffage fonctionnent très bien à pression ambiante (sans mise en pression particulière, et avec un remplissage en point haut uniquement). Ainsi, sans pression dans le système, les fuites sont beaucoup moins inquiétantes.

Cette expérience préalable m'a démontré qu'avec de la réflexion, je pouvais passer moi-même à la réalisation de mon projet.



Figure 6.1
Les capteurs, orientés plein sud.

Réflexion préalable

Comme nous l'avons vu dans la partie « théorie » de cet ouvrage, il est inutile de chauffer l'eau chaude sanitaire à haute température car le rendement du capteur est alors mauvais. Il faut donc toujours chercher à travailler à basse température, ce qui garantit la longévité de l'installation.

Quant à l'expérience que j'ai pu acquérir, elle montre que :

- 4 m² de capteurs permettent de chauffer quotidiennement 300 l d'eau chaude sanitaire à 50 °C ou plus ;
- les bons jours d'été, une surface de capteurs réduite de moitié (2 m²) pourrait suffire (elle permet de faire monter la température de 300 l d'eau chaude sanitaire à 40 °C) ;
- mais un jour d'hiver ou avec peu d'ensoleillement, il faut au moins doubler la surface (8 m² ou plus).

Si j'investis dans un ballon de 300 l, ce n'est pas pour avoir de l'eau chaude sanitaire la moitié de l'année ou seulement en été, quand je suis en vacances : je veux rentabiliser mon ballon et avoir de l'eau chaude sanitaire toute l'année.

Or, techniquement, le fait de surdimensionner les capteurs peut conduire à produire trop et obliger ensuite à disperser ce trop-plein d'énergie. Pour parer à cette éventualité de surchauffe et à un risque d'accident, certains installent des boucles de décharge qui protègent le système solaire en dispersant l'énergie vers des radiateurs installés à l'extérieur, en façade nord par exemple. Il faut vraiment éviter cette solution, contraire à toute logique, et pour cela bien penser dès le départ la conception de son installation.

Mon installation doit répondre aux exigences générales suivantes :

- simplicité, accessible à tous les membres de la famille et aux amis avec

1 Le Consuel intervient sur demande, pour une somme de 100 € environ.

qui j'échange ma maison pour les vacances ;

- durabilité, au moins 20 ans ;
- maintenance aisée, faisant appel à des techniques maîtrisées localement ;
- efficacité (basse température, dimensionnement conforme) ;
- coût minimal au kilowattheure fourni.

Cahier des charges

La solution retenue devait avant tout permettre un travail maximal des capteurs à la plus basse température possible. Afin d'avoir une autonomie en eau chaude sanitaire, la surface de capteurs a été significativement augmentée – mais sans que cela contraigne à utiliser une boucle de décharge. Le volume d'eau chaude sanitaire initialement prévu (300 l) a été conservé, et le potentiel restant sera simplement basculé sur les radiateurs de chauffage de la maison.

Pour basculer en chauffage direct, il suffit de piloter une vanne trois voies (de faible investissement). Travailler à basse température m'assure, sans calculs, que les onze radiateurs de la maison seront toujours en mesure d'obliger les capteurs à travailler de cette manière. Le chauffage ne venant qu'en complément, je compte utiliser cette possibilité lorsque la puissance fournie par rapport aux besoins d'eau chaude sanitaire est suffisante ou pour empêcher la température de trop chuter quand la maison est inhabitée.

Trois capteurs plans de 3 m^2, peints, ont été acquis d'occasion. Ceux-ci seront fortement inclinés pour recevoir le soleil d'hiver (latitude + 15° au minimum), et, surtout, pour dégrader fortement leurs performances l'été. C'est une nécessité absolue pour ne pas avoir à recourir à une boucle de décharge.

Les régulations du commerce étant encore trop inadaptées à ce type de projet, le choix pour la partie commande s'est porté sur un automate programmable industriel (API) utilisé en domotique.

Principe de l'installation

Pour répondre au cahier des charges, j'ai élaboré un schéma hydraulique avec l'aide d'un ami plombier, en minimisant le plus possible les coûts.

Ce schéma hydraulique a été étudié dans un souci d'efficacité et d'économie : seule une vanne trois voies à secteur (TOR : tout ou rien) a été placée sur le retour froid. Il a suffi de mettre des clapets antiretour (CAR) aux bons endroits pour que le système fonctionne. Il est préférable d'employer des clapets AR à battant, à placer horizontalement, car le fonctionnement des clapets à ressort se détériore avec le temps.

Il faut éviter le plus possible les échangeurs pour qu'il n'y ait pas de pertes de rendement inutiles.

Pour cela, on met de l'antigel dans tout le circuit – puisqu'il n'y en a qu'un : le liquide dans les capteurs est le même que celui qui circule dans le serpentin bas du ballon d'eau chaude sanitaire, dans la chaudière et dans les radiateurs. Tout le circuit hydraulique est isobare, c'est-à-dire à pression égale (dans le système, il faut 2 min 30 à la vanne 3V pour passer de la position « production eau chaude sanitaire » à la position « chauffage », soit largement le temps de communiquer pour les fluides).

Le schéma laisse quatre possibilités de fonctionnement à étudier. Nous sommes en effet en présence de deux sources d'énergie, la chaudière fioul et les capteurs solaires : la chaudière peut prendre en charge le chauffage et/ou l'eau chaude sanitaire, le solaire peut prendre en charge l'eau chaude sanitaire ou le chauffage.

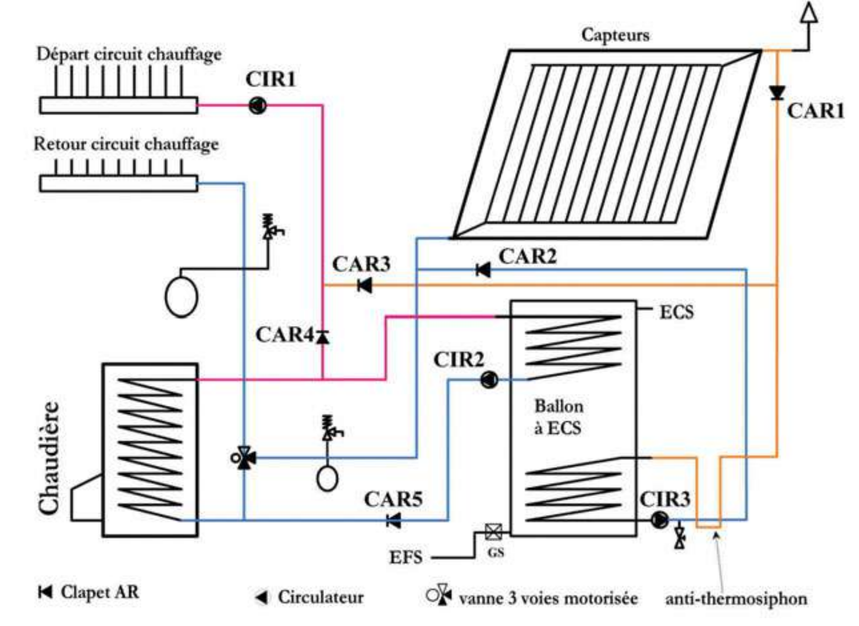


Figure 6.2
Schéma de la partie opérative (hydraulique).

Cas n° 1 : la chaudière fioul prend tout en charge

Ce cas se présente lorsqu'il y a du mauvais temps et plus d'eau chaude sanitaire, la chaudière fonctionnant alors pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage. Nous avons :

- la vanne trois voies sur le chauffage par la chaudière ;
- la chaudière pilote CIR1 (chauffage) et CIR2 (eau chaude sanitaire haut ballon), le CIR3 est à l'arrêt ;
- le CAR3 interdit la circulation vers les capteurs solaires.

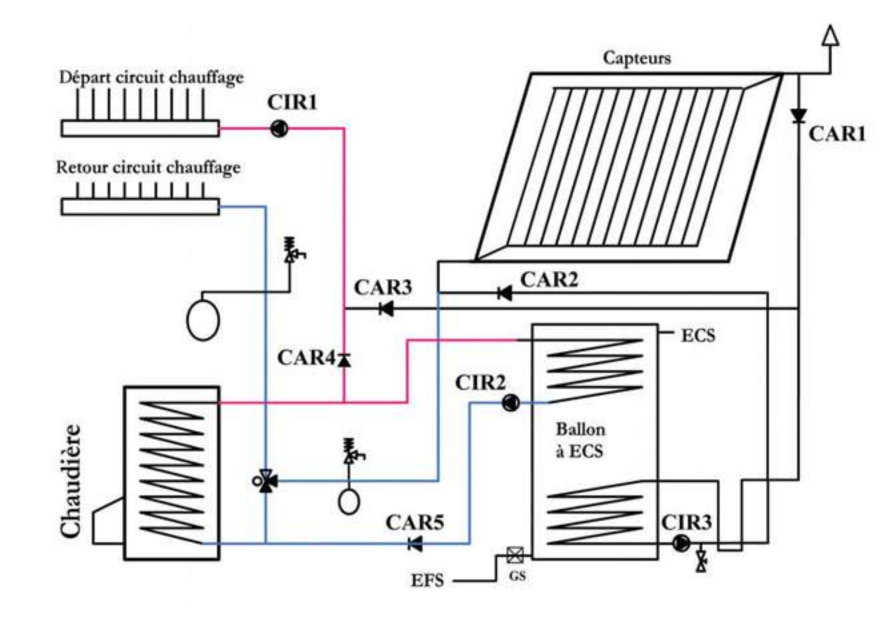


Figure 6.3
Cas 1, la chaudière fioul prend tout en charge.

Cas n° 2 : eau chaude sanitaire solaire et chauffage fioul

Dans ce deuxième cas, nous sommes présents dans la maison et il fait beau et froid. On donne la priorité à l'eau chaude sanitaire solaire ; la chaudière se charge du chauffage car la puissance de chauffe ne nous permet pas d'obtenir un confort suffisant en chauffage solaire. Nous avons :

- la vanne trois voies sur le chauffage par la chaudière ;
- les CIR1 et CIR3 sont en fonction, et le CIR2 à l'arrêt ;
- les CAR3 et CAR5 interdisent à la chaudière de faire autre chose que ce qu'on lui demande.

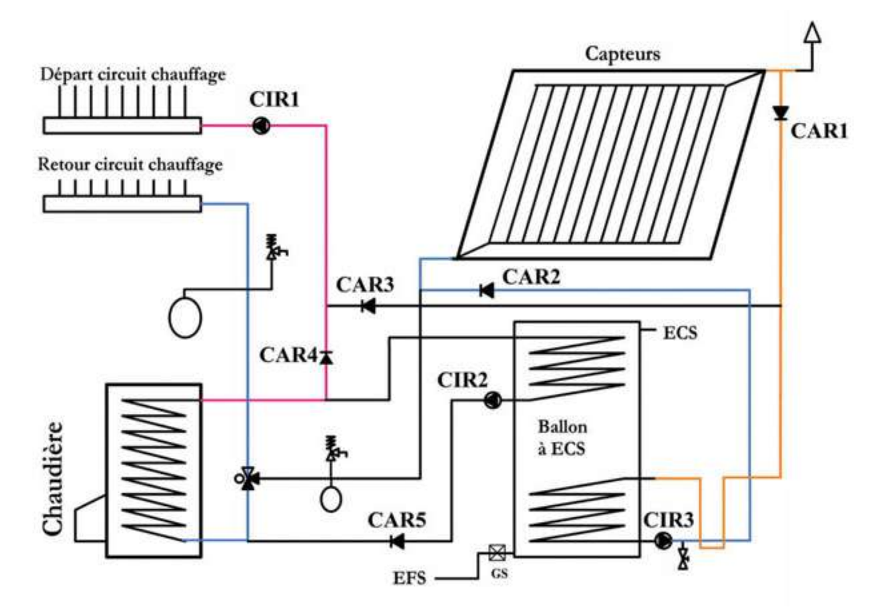


Figure 6.4
Cas 2, eau chaude sanitaire solaire et chauffage fioul.

Cas n° 3 : eau chaude sanitaire solaire, pas de chauffage

Le cas n° 3 est celui de l'été, ou de l'hiver autour de midi (l'apport passif

de la véranda permet d'être autosuffisant en chauffage à ces heures), il n'y a donc pas de besoin de chauffage. Seule l'eau chaude sanitaire solaire fonctionne. Nous avons :

- la vanne trois voies sur le chauffage par la chaudière ;
- les CIR1 et CIR2 sont à l'arrêt, le CIR3 en fonction.

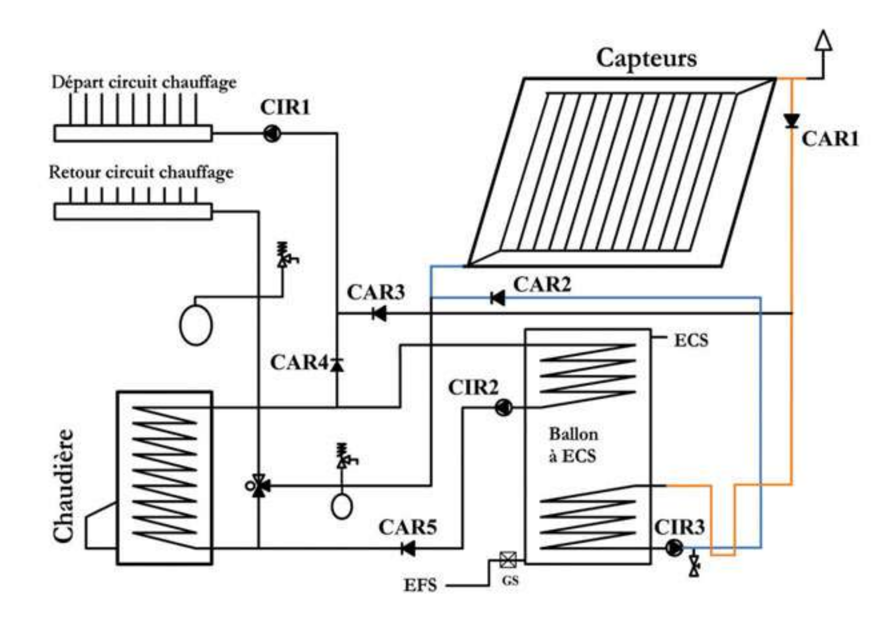


Figure 6.5
Cas 3, eau chaude sanitaire solaire, pas de chauffage.

Cas n° 4 : chauffage solaire, pas de production d'eau chaude sanitaire

Le cas n° 4 correspond à deux situations différentes : nous sommes présents, il fait beau et pas trop froid, on donne donc la priorité au chauffage solaire dont la puissance suffit à chauffer en direct ; ou bien nous sommes en vacances ou partis pour la journée, le chauffage solaire permet alors d'éviter que la maison se refroidisse de trop. Nous avons :

- la vanne trois voies sur le chauffage solaire ;
- le CIR1 est en fonction, les CIR2 et CIR3 sont à l'arrêt ;
- les CAR2 et CAR4 empêchent la chaudière de faire autre chose que ce qu'on lui demande.

Remarque

Une bonne journée peut évidemment être une composition des cas 3 et 4 : chauffage solaire le matin, eau chaude sanitaire solaire autour de midi, chauffage solaire l'après-midi.

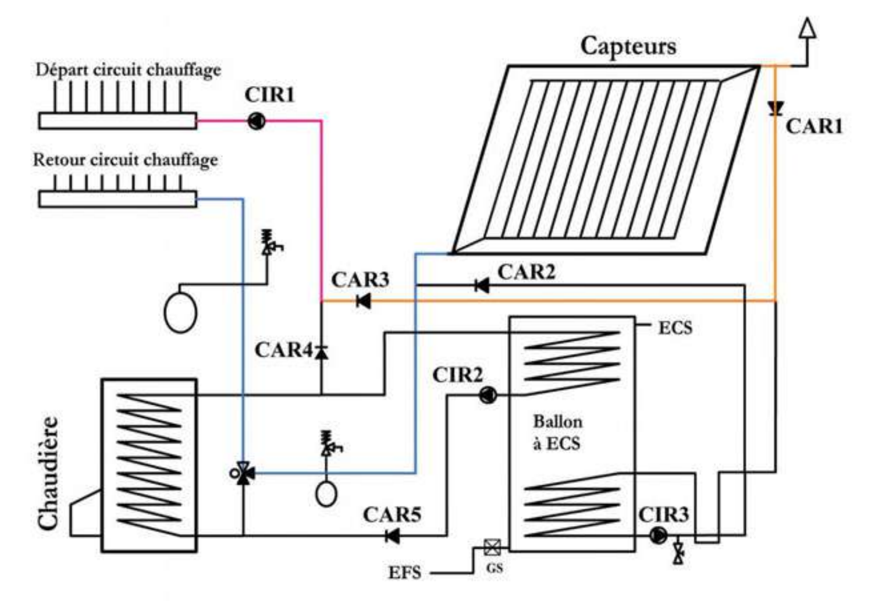


Figure 6.6
Cas 4, chauffage solaire, pas de production d'eau chaude sanitaire.

Les quatre possibilités de fonctionnement

	Cas n° 1	Cas n° 2	Cas n° 3	Cas n° 4
Eau chaude sanitaire	Chaudière	Solaire	Solaire	–
Chauffage radiateurs	Chaudière	Chaudière	–	Solaire

Composants de l'installation

Capteurs solaires plans à effet de serre (insolateur)

Trois capteurs plans en cuivre peints en noir mat de 3 m² ont été achetés d'occasion. Ils vont être placés sur le toit de la partie basse de notre maison : c'est là que l'on trouve le moins de masques, et c'est juste au-dessus de la chaufferie.

J'ai défini l'inclinaison par rapport à la verticale. La latitude du site étant de 44° nord, je l'incline à 60° (soit 44° + 16°) par rapport à l'horizontale. Cette option optimise l'apport en hiver et dégrade considérablement les performances en été. J'aurais pu incliner encore plus, mais la dégradation en été devient alors trop importante sans que le gain en hiver soit significatif.

Les capteurs plans sont bien évidemment montés en parallèle avec une boucle de Tickelman (voir p. 38).



Figure 6.7
Les trois capteurs alignés et inclinés à 60°.

Ballon d'eau chaude sanitaire

À cette époque, je ne bénéficiais pas d'un groupement d'achat de matériels, ni de forums dédiés. Mon choix s'est porté sur l'échangeur B300/2 De Dietrich. Il sera placé à côté de ma chaudière fioul.

La surface d'échange dans le réservoir de 1,44 m² se situe dans la fourchette basse par rapport aux 9 m² de surface de capteurs, puisqu'elle représente 0,19 fois leur surface. La surface d'échange doit représenter 0,2 à 0,3 fois la surface du capteur : 0,2 < S < 0,3.

Transport de l'énergie solaire

Il s'agit d'un départ chaud en cuivre 20/22, utilisé à cause des risques de températures élevées en cas de stagnation, puis de tuyaux PER de 20/25. Le caloporteur est un antigel monopropylène glycol (MPG) 100 l, avec un remplissage au point le plus haut, puis une purge.

En fonctionnement basse température, le système peut fonctionner à la pression ambiante sans risque de bouillir : je remplis l'installation froide, puis je referme.

Étude de la partie commande

Parmi les automates programmables industriels disponibles sur le marché à

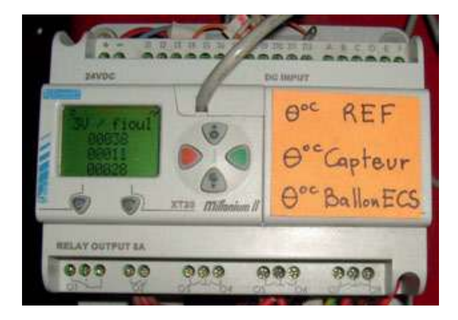


Figure 6.8
L'automate programmable industriel (Crouzet).

l'époque, j'ai sélectionné le Millenium II de Crouzet. La concurrence était Zelio Logic de Schneider et Logo de Siemens. Ce choix est motivé par les fonctions disponibles et les capacités à intégrer facilement des variables analogiques.

Ordres à donner en sortie d'API

Deux circulateurs Wilo-Star-RS 230 V 50 Hz doivent être pilotés : le circulateur de chauffage et le circulateur d'eau chaude sanitaire du bas du ballon. Il y a donc deux sorties TOR.

Il y a également une vanne trois voies à secteur motorisée Siemens VBI31.25 AC 230 V, ce qui donne deux sorties TOR. La vanne se pilote dans chaque sens en permanence, et c'est en fin de course que l'ordre est désactivé avec un Microswitch placé en série sur la commande du moteur.

C'est l'automate qui pilotera le fonctionnement de la chaudière.

On compte ainsi au total cinq sorties TOR.

Informations en entrée d'API

Des sondes fournissent les informations de température (entrée analogique de 0 à 10 V) du capteur solaire, du ballon d'eau chaude sanitaire, de retour de l'eau froide du chauffage.

On peut fabriquer ces sondes avec des bases PT100, PT1000 ou autre. Mais n'ayant pas la compétence, et n'ayant trouvé personne pour m'aider dans cette tâche, j'ai utilisé les sondes dédiées du constructeur, les sondes de référence 89 750 151, – 10 °C à + 60 °C, pour le retour de l'eau froide des radiateurs et la température du ballon, et les sondes de référence 89 750 153, – 10 °C à + 150 °C, pour la température des capteurs.

2 /Priorité au chauffage se lit : non Priorité au chauffage (voir p. 138).

On a alors quatre entrées TOR.

- Une entrée TOR « Manu » permet de forcer le système et de faire marcher la chaudière comme avant, quand le solaire était absent (il faut penser aux utilisateurs).
- Une entrée TOR « Thermostat d'ambiance programmable » basique renseigne sur les seuils de température demandés dans la maison.
- Une entrée TOR « Priorité au chauffage ». Si le bouton n'est pas activé (/Priorité au chauffage[2]), cela équivaut à « Priorité eau chaude sanitaire », je veux donc employer la chaudière pour un peu d'eau chaude sanitaire avec le chauffage, malgré l'hiver, cette journée-là.
- Une entrée TOR « Hiver ».

Fonctionnement de la régulation chaudière d'origine

La régulation Ecocontrol de la chaudière pilote le circulateur d'eau chaude sanitaire du haut du ballon CIR2 et le circulateur de chauffage CIR1.

Fonctionnement du thermostat d'ambiance programmable (TA)

C'est une régulation simple, peu onéreuse, utilisée pour piloter la chaudière ; il y a deux informations TOR en sortie de cette régulation sur trois bornes, NF, NO, la troisième étant le neutre. Ce boîtier est composé de programmes journaliers programmés heure par heure. Deux seuils de température sont réglables par intervalle de 0,5 °C :

- la température agréable (on dira heure pleine, HP), actuellement réglée à 20 °C ;
- et la température pour la nuit ou les périodes d'absence (heures creuses, HC), actuellement réglée à 16,5 °C.

Voici un exemple de programme journalier (voir figure 6.9) : HC de 0 h à 6 h, HP de 6 h à 8 h, HC de 8 h à 11 h, HP de 11 h à 13 h, HC de 13 h à 16 h, HP de 16 h à 20h et HC de 20 h à 0 h.



Figure 6.9
Le thermostat d'ambiance programmable (TA).

Régulation avec le thermostat d'ambiance

Utiliser uniquement le contact NO de cette régulation va me permettre de définir les plages durant lesquelles je peux faire de l'appoint de chauffage.

Durant la plage HC, je considère que je suis absent ou présent avec un besoin en chauffage compatible avec la puissance délivrée par mes capteurs. Inversement, HP m'interdit l'appoint de chauffage pour délester l'apport sur l'eau chaude sanitaire.

Équations pour la régulation du chauffage solaire

La copie d'écran de la figure 6.10 permet de bien comprendre les équations qui suivent. Le fonctionnement du programme

Millenium est développé en annexe. Voici un résumé des notations utilisées :

- « + » : OU logique (OR) ;
- « . » : ET logique (AND) ;
- « / » : NON logique (inverse, se lit barre) (NOT) ;
- I = Input = entrée ;
- O = Output = Sortie.

Sortie autorisation chaudière = O2

O2 = « Manu » + « TA »

- Manu (entrée I4) : forçage manuel de la chaudière.
- TA prog (entrée I5) : plage active du thermostat d'ambiance. Celui-ci délivre un signal « d'autorisation » lorsque la température est inférieure à la consigne. Le signal s'inverse lorsque la température devient supérieure à la consigne, plus un certain delta (hystérésis).

L'automate délivre un signal d'autorisation à la chaudière (forçage par le bouton Manu ou réglage par thermostat d'ambiance programmable en plage horaire, TA). La régulation chaudière est totalement autonome. Elle pilote selon

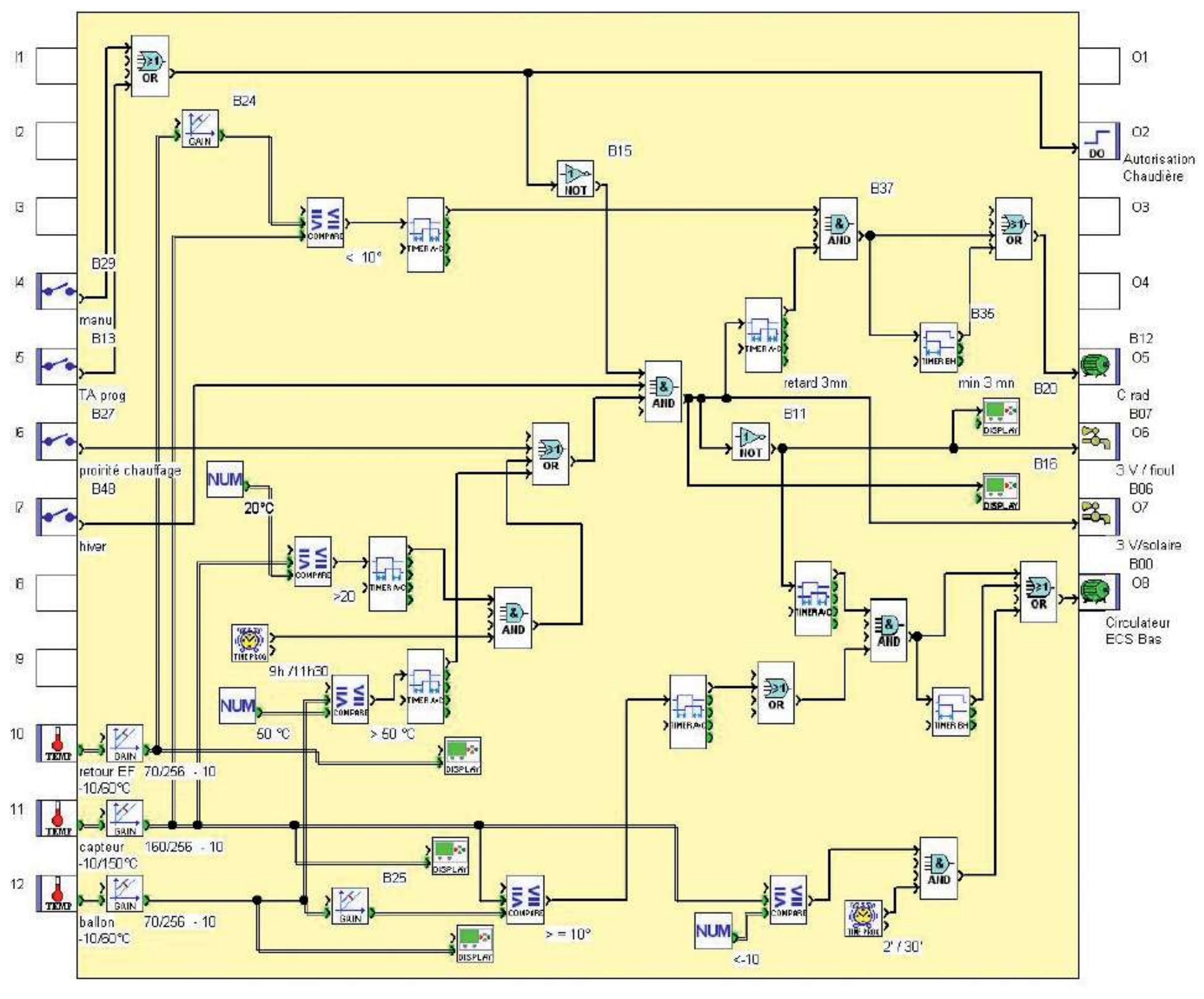


Figure 6.10
Programmation du Millenium.

ses propres critères et réglages le circulateur eau chaude sanitaire haut ballon (CIR2) et le circulateur chauffage (CIR1) en parallèle à la commande de la régulation solaire (Millénium). La chaudière en marche n'empêche pas la production solaire d'eau chaude sanitaire. Pour empêcher TA de laisser la chaudière fonctionner, il suffit de se placer en HC et de régler la consigne à une température basse.

Sortie vanne 3 voies à secteur sur chauffage solaire = O7

O7 = (/manu . /TA prog) . (hiver) . {[(9 h --> 11 h 30) . (temp capteur > 20 °C)] + (priorité chauffage) + (temp Ballon > 50 °C)}

- /manu . /TA prog : on n'autorise le chauffage solaire que si l'autorisation chaudière n'est pas elle-même en fonction. La chaudière est prioritaire mais on peut régler sa consigne par le TA.
- Hiver (entrée I7) : pour arrêter le chauffage solaire en été.
- (9 h à 11 h 30) . (temp capteur > 20 °C) : pour mettre en route le chauffage solaire plus tôt dans la matinée.
- Priorité chauffage (entrée I6) : on force manuellement le chauffage solaire.
- Temp ballon > 50 °C : on n'utilise l'énergie du circuit solaire pour le chauffage que si la température de l'eau dans le ballon est supérieure à 50 °C. Priorité à l'eau chaude sanitaire. On chauffe l'eau sanitaire d'abord et, s'il reste des calories dans le ballon, on les utilise pour le chauffage.

Sortie vanne 3 voies à secteur sur chauffage chaudière = O6

O6 = inverse de la sortie « vanne 3 voies à secteur sur chauffage solaire » = / « vanne 3 voies à secteur sur chauffage solaire »

Sortie circulateur radiateurs (CIR1) = O5

O5 = (Sortie vanne 3 voies sur chauffage solaire retardée de 3 min) . (temp REF < 10 °C temp capteur)

- Sortie vanne 3 voies sur chauffage solaire retardée de 3 min : le circulateur radiateur (CIR1) ne peut être en fonction que si la vanne 3 voies est en position chauffage solaire. Le but du retard de 3 min est de permettre l'établissement d'un régime stable des fluides dans les branches avant de mettre en marche ce circulateur, le temps de commutation de la vanne 3 voies étant de 2 min 30.
- Temp REF < 10 °C temp capteur : différentiel de 10 °C entre la température des capteurs et celle du retour eau froide radiateurs (REF).

Sortie circulateur eau chaude sanitaire bas (échangeur solaire) (CIR3) = O8

O8 = {(Sortie vanne 3 voies sur chauffage fioul retardée de 3 min) . (temp ballon < 10 °C temp capteur)} + {(temp capteur < – 10 °C) . (minuterie 4/30 min)}

- Sortie vanne 3 voies sur chauffage fioul retardée de 3 min : le circulateur eau chaude sanitaire bas (échangeur solaire) ne peut être mis en fonction que si la vanne 3 voies est positionnée sur le circuit chauffage fioul. Le but du retard de 3 min est de permettre l'établissement d'un régime stable des fluides dans les branches du circuit avant de mettre en marche ce circulateur, le temps de commutation de la vanne 3 voies étant de 2 min 30.
- Temp ballon < 10 °C temp capteur : différentiel de 10 °C entre la température des capteurs et celle du ballon d'eau chaude sanitaire.
- (Temp capteur < – 10 °C) . (minuterie 4/30 min) : pour éviter les problèmes de gel du capteur et de la tuyauterie extérieure liés à une protection de gel trop faible (taux de glycol), le circulateur est mis en fonction 4 min toutes les 30 min.

Mise en œuvre de la régulation solaire

Des équations ci-dessus découle la programmation du Millenium II. Il s'agit ensuite d'en connecter les entrées et les sorties, comme indiqué sur les figures 6.11 et 6.12.

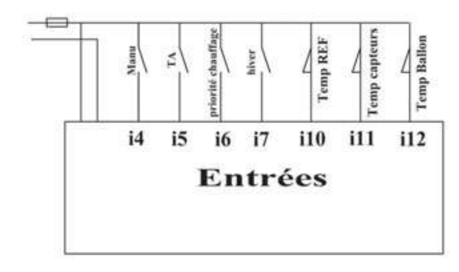


Figure 6.11
Schéma électrique de câblage des entrées automate (API Crouzet XT20R).

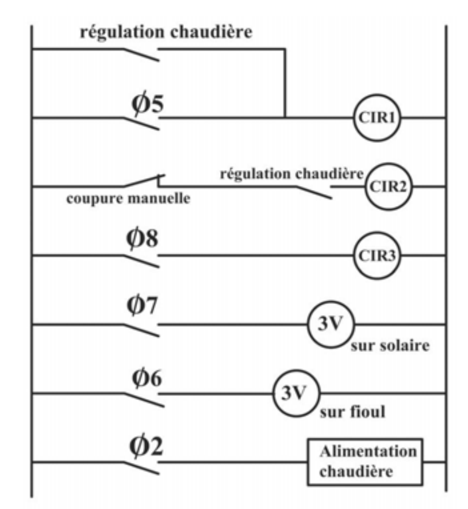


Figure 6.12
Schéma de câblage des sorties puissance.

Bilan et perspectives

Durée des travaux

- Acheminement des capteurs sur le site : un jour.
- Démontage, révision, remontage des capteurs : deux jours.
- Réalisation du bâti pour recevoir les capteurs (découpage, soudage, peinture, assemblage, mise en place et scellements) : trois jours.
- Mise en place des capteurs, câblage PER et raccordement : cinq jours.
- Câblage électrique : un jour.
- Mise en eau, chargement de la version 1 de mon logiciel, test : une heure. J'ai passé le reste de la journée à faire des allers et retours entre mon écran, le ballon, les radiateurs et les capteurs, à regarder le système fonctionner. Actuellement, à force de petites améliorations du logiciel, j'en suis à ma 8e version : celle-ci semble répondre à mes attentes.

Constats au fil des mois

Avec 300 l d'eau chaude sanitaire à 50 °C et trois personnes au foyer, nous sommes autonomes deux jours (la belle journée et la suivante).

Pour des raisons de facilité de calcul de gain et de rendement, les valeurs indiquées sont celles de l'eau chaude sanitaire ; le gain en chauffage, plus important car le capteur travaille à plus basse température, est beaucoup plus difficile à estimer.

- Septembre : par une belle journée ensoleillée, chauffage de 300 l d'eau de 35 °C à 50 °C. À partir de 13 h et jusqu'à 17 h, chauffage de la maison (l'automate est sur la position priorité à l'eau chaude sanitaire avec basculement / chauffage à partir de 50 °C).
- Novembre : par une belle journée ensoleillée, chauffage de 300 l d'eau de 35 °C à 50 °C.
- Décembre et janvier : le capteur a du mal à monter en température. Fin décembre, chauffage de 300 l d'eau de 35 °C à 47/48 °C.
- Avril : chauffage de 300 l d'eau de 35 °C à 50 °C. À partir de 13 h jusqu'à 17 h, chauffage de la maison (automate sur position priorité à l'eau chaude sanitaire avec basculement / chauffage à partir de 50 °C).



Figure 6.14
Remplissage, vanne d'arrêt, purgeur.



Figure 6.15
De gauche à droite : le ballon d'eau chaude sanitaire, l'API et l'ordinateur portable posés sur la chaudière.



Figure 6.13
Montage du châssis.

- Mai : durant ce mois (en 2004), la masse d'air est instable, il y a de fortes convections, et à partir de 13 h, une formation rapide de cumulus (nébulosité 8/8) ; il n'y a donc plus d'activité à partir de cet horaire. Le ballon n'atteint pas tous les jours 50 °C. C'est là une météo classique des Alpes du Sud, ce qui amène à penser qu'il serait peut-être judicieux d'orienter les capteurs un peu plus vers l'est.
- Juin : l'inclinaison forte des capteurs et la température extérieure encore modérée permettent de maintenir une différence de température d'environ 12 à 15 °C, qui amène tranquillement mon ballon de 300 l aux environs de 50 °C.
- Juillet/août : cette période pose moins de problème que la précédente, car les températures extérieures sont plus importantes. La différence de température est donc réduite, ce qui permet au ballon d'atteindre 60 °C.

La première année, avec un programme donnant la priorité à l'eau chaude, j'ai économisé 750 l de fioul. Pour la deuxième année de fonctionnement, la priorité a été donnée au chauffage, et j'ai alors économisé 1 450 l de fioul.

Bilan technique

Quoi que l'on veuille chauffer, il faut toujours choisir une configuration qui permette un travail des capteurs aux températures les plus basses possibles. Le paramètre le plus influent sur le rendement du capteur est la variation de température entre le capteur et l'extérieur. Par exemple, en décembre, la température extérieure est de – 5 °C ; pour chauffer un ballon d'eau chaude sanitaire à 50 °C, on arrive à une différence de température de 65 °C (le circulateur s'enclenche lorsque la température des capteurs est supérieure d'environ 10 °C à celle du ballon). En revanche, pour une utilisation en chauffage, même avec des radiateurs, on passe facilement à une différence de température de 35 ou 45 °C. Avec cette différence, on observe dans la documentation technique disponible un doublement du rendement.

Avec un système combiné, c'est donc vers la priorité au chauffage de la maison qu'il faut s'orienter durant l'hiver et l'intersaison, et privilégier l'eau chaude en été. Cette priorité au chauffage est d'autant plus intéressante que le coût du chauffage est au moins cinq fois supérieur à celui de l'eau chaude.

La forte inclinaison de mes capteurs plans permet d'optimiser la surface installée pour le chauffage ; cette surface très inclinée, avec une performance très dégradée en été, permet, durant cette période, l'autonomie totale en eau chaude sanitaire sans recours à une occultation partielle ou à des radiateurs de décharge. Une fois installé, ce système fonctionne seul, sans aucune intervention. L'été, je peux partir en vacances sur une longue période sans souci car les capteurs plans peints saturent sans provoquer de surchauffe.

Cette saturation des capteurs plans à haute température pourrait être jugée comme pénalisante, mais elle constitue en réalité un énorme avantage pour un système solaire de chauffage : quand la température monte, la différence de température croît, et le rendement s'écroule. Le système s'autorégule et empêche de cette manière les accidents.

Bilan financier

Tous ces éléments et matériaux représentent un coût total de 2 245 € TTC. Si nous étions passés par un installateur, le coût aurait été de l'ordre 12 000 à 14 000 €.

J'ai tenu à exposer le projet en couplant mes deux énergies domestiques : si l'économie en consommation de fioul est moins importante qu'en électricité, c'est parce que j'ai opéré le maximum de transfert de l'électrique vers le thermique de manière à avoir la possibilité de m'équiper d'un champ de capteurs photovoltaïques moins onéreux. Surtout, l'eau chaude solaire va permettre de réduire considérablement les consommations du lave-linge et du lave-vaisselle. Point important : les besoins en eau chaude sanitaire sont souvent donnés pour 45 l/personne/jour, ce qui est insuffisant quand on alimente aussi ces appareillages. Il faut plutôt compter 65 l.

Le retour sur investissement s'est effectué en moins de deux ans.

Répartition des coûts

Tâches et matériel	Coût (en €)
Ballon B300/2 (2 échangeurs)	734
Tuyauterie (raccords, tuyaux, clapets, circulateurs, etc.)	523
Vanne 3 voies à secteur motorisée Siemens VBI31.25 AC	190
9 m² de capteurs solaires cuivre (peints, d'occasion)	300
Millenium II de Crouzet : kit XT20R 24VDC	199
Alimentation 24 VDC	75
Sondes de température Crouzet (3)	256
Glycol dit « alimentaire » : monopropylène glycol (MPG), 100 l	140

Coûts

Consommation énergétique antérieure : 6 360 kWh d'électricité et 3 000 l de fioul.

Économie d'énergie réalisée : 4 160 kWh d'électricité et 1 450 l de fioul (soit, en 2006, 1 382 €).

Coût de l'installation : 2 245 €.

Améliorations

L'étude technique qui a été proposée ici synthétise les éléments les plus pertinents et les plus intéressants de mon expérience.

Des modifications ont pu être apportées ensuite à mon système, mais les principes généraux sont restés les mêmes.

Par ailleurs, il reste encore bien des choses à améliorer.

Je me suis équipé l'hiver dernier d'un joli poêle de 10 kW que je vais modifier et transformer en bouilleur pour éliminer la chaudière fioul.

J'ai par ailleurs optimisé le fonctionnement de ma véranda en automatisant l'ouverture d'une des portes qui donne dans la montée d'escalier (dont je ne me servais pas). Quand l'apport solaire passif atteint 23 °C dans la véranda, la porte bascule.

Étant satisfait des performances de mon système solaire, je suis passé à la vitesse supérieure depuis cet automne : je viens de rajouter sur le toit de l'appentis du garage que j'ai autoconstruit quatre capteurs plans Tinox de 2,5 m^2 reliés à un nouveau ballon de 300 l, avec quasiment aucun changement du logiciel (investissement minimum). Sans surprise, l'installation fonctionne. L'apport direct dans les radiateurs, étant doublé, génère de l'inconfort en journée (beaucoup trop chaud dans la maison) et ne convient plus : il va falloir dans l'avenir le déphaser en stockant l'énergie dans une réserve d'eau morte disponible à la demande. Je vais faire une chose après l'autre : construire

Approche plus globale : les négawatts

Quand on transforme la consommation en économie, quand on préfère la sobriété énergétique au gaspillage – car on parvient à rompre avec certaines mauvaises habitudes –, on parle de production de négawatts. Il existe partout de véritables « gisements de négawatts ». Chacun, au quotidien, peut en produire : remplacer une classique ampoule de 100 W par une lampe basse consommation de 20 W revient à utiliser cinq fois moins d'énergie pour assurer un même niveau d'éclairage. Le remplacement de cette lampe génère 80 watts « en moins » : on parle alors de production de 80 négawatts.

C'est cette approche de négawatts que nous avons mise en place, de manière familiale, dans notre maison à Saint-André-les-Alpes. Notre équipement de départ comprend un radiateur électrique souffleur dans la salle de bains, un chauffe-eau électrique, un lave-linge, un lave-vaisselle, un four électrique, un vieux frigidaire, du matériel hi-fi, un micro-ordinateur, des lampes classiques à incandescence, deux lampes de 500 W halogènes, du matériel de bricolage portatif, une chaudière fioul pour le chauffage central uniquement de 15 ans d'âge.

Sur deux ans, voici les actions négawatts que nous avons réalisées (nous avions une consommation d'électricité annuelle de 6 360 kWh) :

– suppression du chauffe-eau électrique ;

– adjonction d'une véranda en façade sud, qui permet un apport en solaire passif et une isolation nocturne ;

– installation en autoconstruction d'un système de chauffage solaire combiné eau chaude et chauffage, avec appoint par une chaudière fioul neuve (chauffage de l'eau chaude et des radiateurs par capteurs solaires à liquide caloporteur) ;

– suppression des lampes halogènes ;

– remplacement des cinq dernières vieilles menuiseries par du double vitrage ;

– remplacement du radiateur électrique par un radiateur sèche-serviettes chauffé au solaire/fioul ;

– branchement du lave-vaisselle directement sur l'eau chaude (solaire) et branchement du lave-linge sur l'eau chaude (solaire) et sur l'eau froide avec un robinet thermostaté (le type de robinet que l'on peut trouver dans une douche) – car les résistances de chauffage de l'eau qui équipent ces deux appareils consomment énormément ;

– pose d'interrupteurs pour empêcher les appareils munis de système de veille de consommer inutilement ;

– remplacement des lampes classiques à incandescence par des ampoules éco-énergie.

Cette démarche s'avère triplement gagnante :

– pour le consommateur, car il voit ses factures d'énergie diminuer ;

– pour l'emploi, par le développement décentralisé, dans chaque région, des métiers de l'énergie ;

– pour la planète, car l'énergie la moins polluante est celle que l'on n'a pas besoin de consommer.



Figure 6.16
Porte à ouverture automatique permettant de profiter de l'apport passif de la véranda.

le bouilleur sur mon poêle, puis enlever la chaudière et la réserve de fioul pour la remplacer par un ballon d'eau morte de 2 000 l.

Au niveau de l'isolation, ma façade nord étant sans ouverture, je compte l'isoler par l'extérieur cet été ou le suivant avec du chanvre banché. Il s'agit là d'une technique simple et peu coûteuse.

En termes d'autonomie électrique, ma consommation étant devenue très raisonnable, je cherche maintenant à m'équiper d'une installation solaire photovoltaïque capable d'assurer l'autonomie du foyer.

Pour conclure

On entend souvent dire que le chauffage solaire est peu compatible avec une dissipation par radiateurs ; c'est absolument faux, il faut simplement que l'installation puisse travailler à la plus basse température possible pour qu'elle donne tout son rendement, quels que soient les volumes à chauffer. Pour une efficacité maximale, les radiateurs doivent être surdimensionnés – mais c'est déjà le cas de beaucoup d'installations de l'habitat individuel.

Un principe fondamental doit être retenu : dans le cas d'un projet de chauffage, plus le besoin en surface de capteurs augmente pour le chauffage d'hiver, plus il faudra incliner fortement les panneaux (de 60° à 90°). De cette façon, on réduit considérablement leur efficacité l'été, quand justement le besoin en eau chaude sanitaire est faible, on évite ainsi d'avoir à mettre en place une boucle de décharge.

De la même manière, il est utile de rappeler que les besoins en eau chaude sanitaire sont souvent donnés pour 45 l/jour/personne, ce qui est insuffisant quand on alimente aussi le lave-linge et le lave-vaisselle en eau chaude sanitaire solaire : il faut compter plutôt 65 l.

L'autoconstruction apporte l'immense plaisir de regagner de l'autonomie en s'appropriant une technique simple, durable, efficace, peu coûteuse en énergie grise (l'énergie nécessaire à la fabrication, à l'utilisation et au recyclage du produit) et réparable localement (c'est le cas des capteurs plans). Elle participe ainsi d'un comportement citoyen vis-à-vis de la planète et respectueux des générations futures.

Réalisation n° 2

par Claude Mandrille (propos recueillis par Pierre Amet)

- 25 m² de capteurs plans
- Eau chaude sanitaire 600 l
- Appoint chauffage direct dans les radiateurs
- Régulation simple du commerce





Nous avons acheté un cabanon de deux pièces en 1962 afin que notre famille se retrouve à la campagne pendant les week-ends et les congés – du fait de mon emploi, nous avons toujours habité dans des logements de fonction. Nous l'avons agrandi à trois reprises avec mon épouse et il est devenu l'attache bienvenue pour un ancrage des souvenirs de la famille. Passé de 12 m² en 1962 à 120 m² aujourd'hui, nous y vivons à deux personnes.

Dans ces agrandissements, le point de vue purement chauffage a été une prise en charge importante. Nous avons réalisé diverses évolutions en procédant là aussi par étapes :

- tout d'abord la construction d'une cheminée ouverte ;
- en 1973, l'installation par un professionnel d'un chauffage central au fioul avec une petite chaudière Effel ;
- en 1978, nous avons acheté une chaudière à bois Deville afin de tirer profit de la situation de la maison – elle est adossée à une petite forêt nous appartenant, autant profiter de l'aubaine ;
- en 1984, la vieille chaudière Effel a été changée par une chaudière à basse température Weissman qui m'a donné entière satisfaction pendant 22 ans ;
- elle a été remplacée en 2006 par une chaudière à condensation ;
- entre-temps, au gré des agrandissements, une grande cheminée fermée avec système d'air pulsé est autoconstruite. Elle fonctionne avec l'ancienne turbine d'un brûleur à mazout récupérée ;
- nous avons effectué l'isolation des combles et des dépendances, les huisseries en bois ont été remplacées par de l'aluminium, et un double vitrage a été mis en place.

Quelques mots sur l'autoconstructeur

Âge : 71 ans

Formation : études secondaires au lycée Gassendi de Digne.

Profession : receveur à la poste.

Intérêts particuliers : le bricolage, la randonnée pédestre, une tendresse toute particulière pour la « pierre ».

Domaine de réticence au départ : l'électricité, la régulation.

Dans les années 1980, j'avais déjà conscience du gaspillage des énergies non renouvelables, de la pollution, de la déforestation. Pressentant l'augmentation continue du fioul, je m'étais intéressé au solaire pour chauffer la maison. À l'époque j'avais même visité une entreprise de

fabrication de capteurs solaires basée dans la région. Par manque de disponibilité, de budget, mais surtout parce qu'il existait à l'époque peu d'informations – le chauffage solaire n'était vraiment pas développé –, je n'ai alors pas osé me lancer.

Le déclic viendra début 2007 : j'assiste dans ma commune à une conférence sur les énergies renouvelables. À cette occasion je rencontre Pierre Amet, président de l'Apper, qui y assistait lui aussi. Il me conforte dans ma décision et me confirme la faisabilité de l'opération.

Pierre habite à 1 km de chez moi. Peu de temps plus tard, il m'indique que l'année précédente, l'association Apper a récupéré 96 anciens capteurs dont certains sont encore dans son jardin. Ces panneaux solaires ne sont pas à vendre, mais à donner. La seule contrainte est de les réviser ; ils m'appartiendront dès lors qu'ils seront en fonctionnement ! J'accepte le contrat avec plaisir.

Pierre Amet m'a dessiné les schémas hydrauliques et électriques de l'installation, et s'est proposé de m'aider à câbler la partie électrique et lors de la mise en route de l'installation. En cas de problème en plomberie, je savais que je pouvais faire appel à Jean-Marie, professionnel compétent du village qui m'a installé la chaudière.

L'opération était lancée, à moi de travailler. Je ne pouvais plus reculer.

Il me fallait déterminer quel était le matériel nécessaire, faire les plans, chiffrer le montant de l'investissement ; toutes ces étapes étaient à anticiper de manière très rigoureuse.

L'installation devait satisfaire les critères suivants : simple ; efficace ; facile à piloter (j'avais initialement prévu de piloter moi-même les différentes positions des vannes, mais il était plus raisonnable d'opter pour des vannes trois voies et une régulation – le soleil n'a rien à voir avec une énergie classique qui alimente la chaudière, on ne l'éteint pas d'un simple clic !) ; non sujette à des surchauffes estivales.

Fonctionnement de l'existant

Schéma de l'installation hydraulique

Il y a deux chaudières (fioul et bois), un ballon d'eau chaude sanitaire de 200 l, un chauffe-eau électrique, un chauffe-eau fonctionnant au gaz, et des radiateurs.

L'installation fonctionne en demi-saison avec l'utilisation de la chaudière bois ; en saison de grand froid, la chaudière fioul assure la relève du chauffage et de l'eau chaude sanitaire.

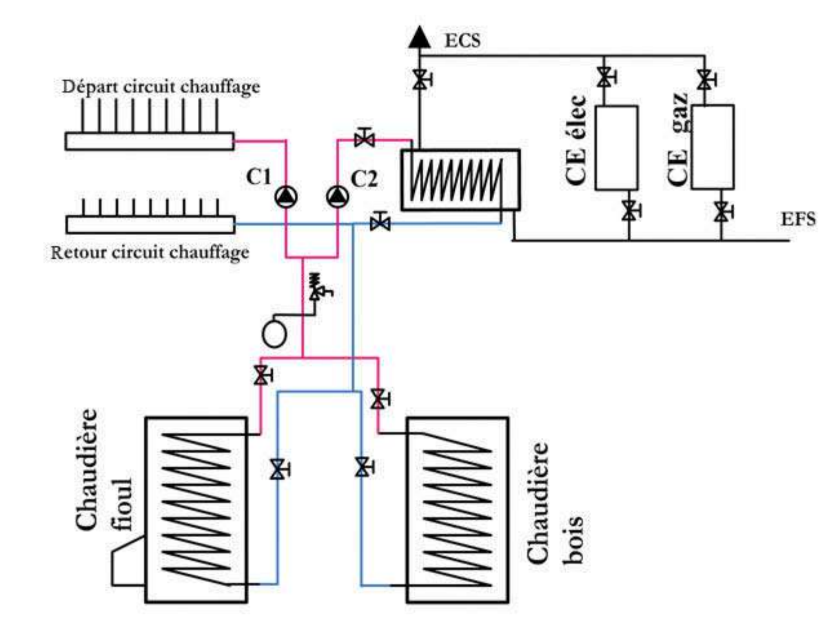


Figure 7.1
L'installation existante.

Schéma de l'installation électrique

La chaudière au fioul peut commander les circulateurs C1 et C2.

Les contacts notés de 1 à 5 sont ceux que l'on aperçoit sur la figure 7.4. Les choix sont manuels :

1 : coupure générale ;

4 et 5 basculés : en fioul ;

2 et 3 basculés : en bois (commande manuelle directe permanente des deux circulateurs).

Le projet

Principe de l'installation

L'idée étant d'investir le minimum, j'ai par conséquent copié l'installation de Pierre Amet en l'adaptant à ma configuration et à mes compétences.

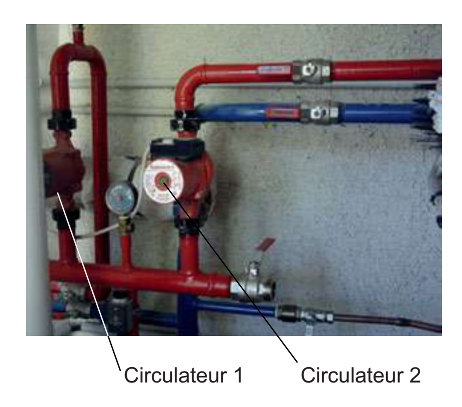


Figure 7.2
Le départ de la chaufferie existante.



Figure 7.3
De gauche à droite, le ballon d'eau chaude sanitaire, l'eau chaude sanitaire électrique, le chauffe-eau gaz.

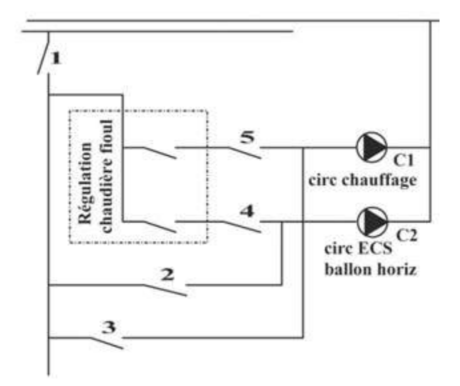


Figure 7.4
Schéma de l'installation électrique existante.



Figure 7.5
Tableau électrique de commande.

Par rapport au circuit existant, deux vannes trois voies à secteur ont été ajoutées, afin d'assurer une circulation normale en chauffage solaire, même en cas d'oubli ou de mauvaise manipulation. Cela dit, la vanne 3V1 n'est pas obligatoire.

Côté ballon d'eau chaude sanitaire solaire, le deuxième serpentin supérieur n'est pas raccordé. Il servira lorsque le ballon horizontal existant sera usé. Suivant les basculements des multiples vannes, l'eau chaude sanitaire solaire pourra aller alimenter directement le réseau ou passer par les trois modes de chauffage de l'eau déjà présents (chaudière fioul ou bois selon la saison, chauffe-eau gaz et chauffe-eau électrique).

Programmation de la régulation

Pour l'instant, sur le marché des régulations solaires, il est difficile de trouver exactement la régulation préprogrammée que l'on veut. Il faut donc adapter celle qu'on a trouvée à son besoin. Ici, j'utilise le programme 6 de la régulation Resol Deltasol BS Pro destiné à la charge de deux ballons.

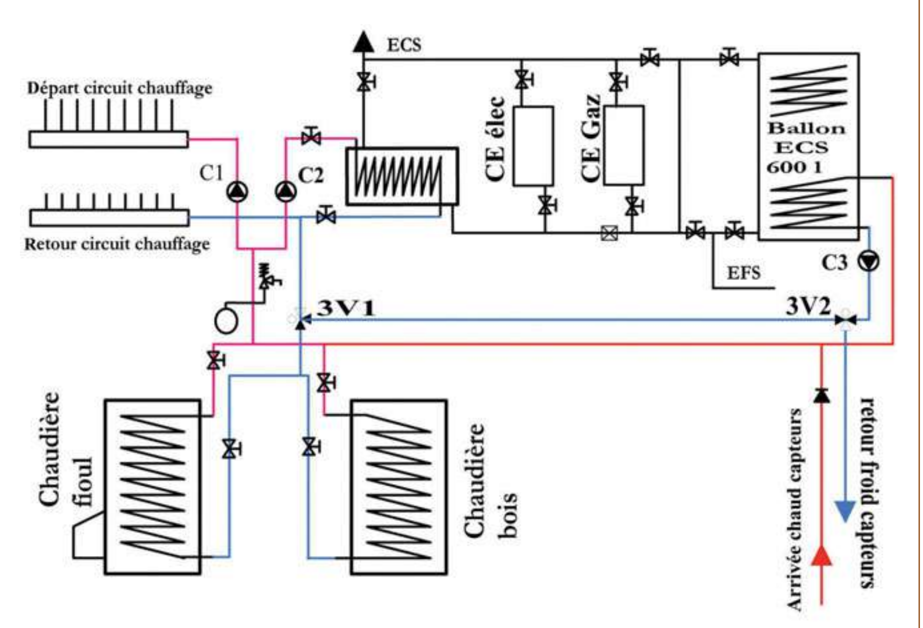


Figure 7.6
Schéma hydraulique de l'installation.

La régulation permet de choisir facilement la priorité de charge au ballon désiré et les seuils de température de basculement. J'ai donné la priorité à l'eau chaude sanitaire solaire, la température collectée y est fiable du fait du placement de la sonde dans le ballon. La sonde de température « retour eau froide radiateurs » a été placée entre les deux vannes trois voies, le plus près possible de 3V1, de manière à avoir une idée la plus juste possible de cette température au démarrage du chauffage solaire.

Pour passer en chauffage, il suffit que je baisse la consigne de seuil de basculement du ballon vers le chauffage en dessous de la température réelle du ballon.

Les bornes 17 et 18 de la régulation (figure 7.7) pilotant normalement le circulateur R1 commandent la bobine du contacteur KRS1 (voir figure 7.8). Cette bobine ferme trois contacts normalement ouverts (Krs1), qui commandent les deux vannes trois voies dans le bon sens de circulation et le circulateur associé (C1 pour notre cas). Il en est de même pour les bornes 15 et 16, qui commandent la bobine du contacteur KRS2. Cette bobine ferme trois contacts NO (notés Krs2 sur le schéma), qui commandent dans l'autre sens de circulation et le circulateur C2.

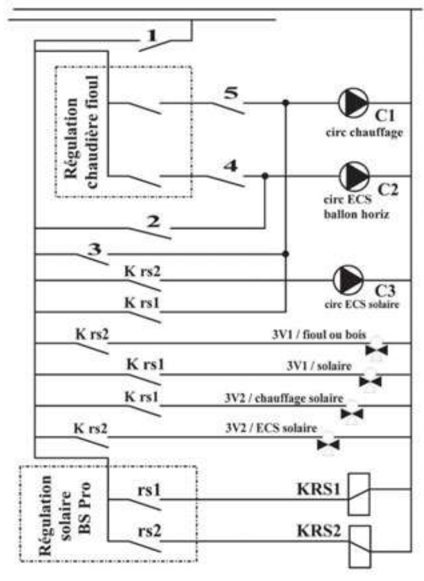


Figure 7.8
Schéma électrique.

Composants de l'installation

- Vingt capteurs plans d'occasion de 1,27 m^2 : ils sont disposés 2 par 2, dans le sens de la hauteur, et en série (du fait des collecteurs en acier – l'acier est moins performant que le cuivre et a du mal à monter en température), avec une vanne en haut et en bas de chaque unité de deux panneaux ; cette vanne permettra de pouvoir les isoler en cas de fuite.

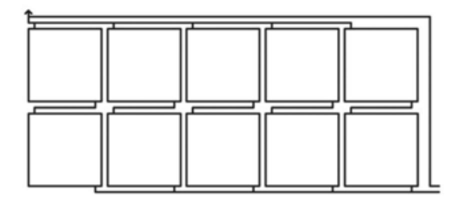
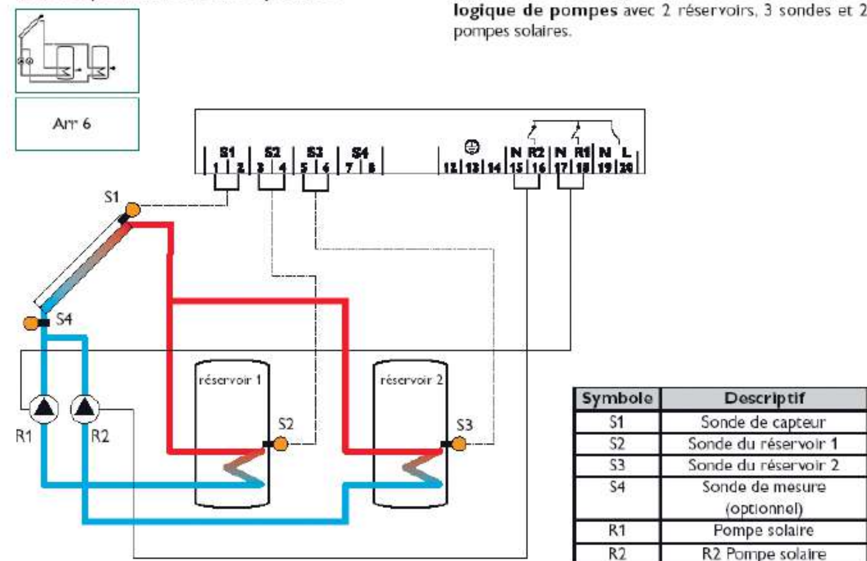


Figure 7.9
Schéma de principe des raccordements des capteurs.

- Un ballon d'eau chaude sanitaire de 600 l.
- Un collecteur aller-retour avec boucle de Tickelman en cuivre 20/22. Des tuyaux PER, enterrés, relient les capteurs et le stock.
- Une régulation Resol Deltasol BS Pro.



Symbole	Descriptif
S1	Sonde de capteur
S2	Sonde du réservoir 1
S3	Sonde du réservoir 2
S4	Sonde de mesure (optionnel)
R1	Pompe solaire
R2	R2 Pompe solaire

Figure 7.7
Schéma constructeur : programme 6 de la régulation Resol BSPRO (source Resol).

Déroulement des travaux

Remise en état des capteurs solaires

Les vingt capteurs étaient à remettre en état. Ils présentaient des détériorations au niveau de la coque, des joints d'étanchéité, et surtout du radiateur lui-même (traces de rouille, peinture détériorée, et quelques fuites).



Figure 7.10
Un des panneaux solaires à remettre en état.



Figure 7.11
Les capteurs prêts à être utilisés.

Il a fallu démonter chaque panneau, nettoyer le joint, la vitre, coller des chevilles dans l'emplacement des anciens rivets pop, poncer, rechercher les fuites, souder à froid, peindre, effectuer des essais, puis le remonter.

Installation des capteurs

Une tranchée d'une profondeur de 60 cm environ a été creusée sur une vingtaine de mètres entre les panneaux et la maison (où se trouve le stock). Elle est destinée à recevoir les deux tuyaux PER ainsi qu'une gaine pour le câble de la sonde des capteurs. Les deux tuyaux PER sont passés dans un tube PVC de 100 et noyés dans de la mousse Isolmousse Bostik.



Figure 7.12
La tranchée entre les panneaux et la maison.

Quatre cadres ont été confectionnés. Chaque cadre, qui supporte quatre panneaux, est maintenu par deux jambes de force.

Mise en service de l'installation

Le ballon 600 l a été mis en place, deux vannes trois voies ont été ajoutées. Le ballon et la régulation Resol Deltasol BS Pro ont ensuite été raccordés à l'installation existante. Les câblages électriques ont été effectués, la régulation a été programmée. Enfin, l'installation a été mise en service.



Figure 7.13
Les cadres destinés à supporter les panneaux.



Figure 7.14
Mise en place des panneaux.



Figure 7.15
Le ballon d'eau chaude sanitaire.

Bilan et perspectives

Durée des travaux

- Environ 40 jours de travail pour la remise en état des capteurs (2 jours et demi par capteur).
- 19 jours pour l'installation des capteurs : 7 jours pour la tranchée (y compris son rebouchage), 7 jours pour la réalisation des cadres (en comprenant des scellements), 5 jours pour la pose des panneaux (en tenant compte des trous, du scellement des cadres, de la confection du collecteur, de la pose du doigt de gant).
- 4 jours pour la mise en place du ballon, des deux vannes trois voies, de la régulation Resol Deltasol BS Pro, le raccordement à l'installation existante, les branchements électriques, la programmation de la régulation, la mise en service de l'installation.

Au total, il s'agit d'un chantier de 63 journées. J'ai passé environ 2/3 du temps à réparer les capteurs – ce qui n'est rentable que pour un retraité.

Bilan financier

La réfection des capteurs donnés par l'association Apper m'a permis d'économiser environ 2 500 €. Ainsi, avec un coût total inférieur à 4 000 €, mon installation m'est revenue environ trois fois moins chère que si elle avait été réalisée par un professionnel.

Coûts

Consommation énergétique antérieure : 4 450 kWh/an, 1 450 l de fioul et 3 st de bois.

Économie d'énergie réalisée : non encore connue.

Coût de l'installation : 3 998,04 €.

Répartition des coûts

Tâches et matériel	Coût (en €)
Mise en état des capteurs	70,59
Construction des cadres supports des capteurs avec jambes de force	354,26
Fournitures diverses pour le raccordement des capteurs et des tuyaux	279,76
Ballon 600 l avec double échangeur en secours, et résistance de secours	989,09
Régulation Deltasol BS Pro	245,89
Fournitures diverses pour raccordement, vannes secteur, moteurs	1 352,58
Matériel électrique	139,73
Main-d'œuvre (plombier) pour le raccordement hydraulique entre la chaudière et le solaire	147,70
Mitigeur thermostatique pour le raccordement de la machine à laver sur l'eau chaude solaire	19,50
Isolant tuyau (Armaflex)	52,79
Circulateur	146,00
Main-d'œuvre (plombier) pour le raccordement entre le ballon et la chaudière	200,15
Total	3 998,04

Bilan technique

Nous sommes au début de l'automne, les résultats sont concluants. Sans aucun souci de manipulations, nous disposons d'une autonomie d'eau chaude de 800 l (600 + 200 l existants en série), soit quatre jours sans soleil. Le solaire fournit également les calories pour chauffer la salle de bains, et pour un chauffage d'appoint utilisé sur un ou deux radiateurs en matinée et en soirée. L'installation étant récente, le chauffage n'a pas encore pu être beaucoup testé.

Pour conclure

Je suis content d'être venu à bout des travaux, moi qui n'avais pas de compétences particulières dans certains domaines, en particulier en matière d'électricité ou de régulation. Je conseille à tous ceux qui hésitent à franchir le pas de se faire plaisir et d'aller au bout de leur envie, car la satisfaction que l'on retire à ainsi autoconstruire son système et à l'adapter à ses besoins est très grande. Ils contribueront de plus, même modestement, à l'atténuation des problèmes que nous laisserons en héritage aux générations futures.

Réalisation n° 3

par Gabriel Gourdon

- 4,50 m² de capteurs à tubes sous vide pour l'appoint au chauffage
- Eau chaude sanitaire 300 l
- Chauffage par radiateurs
- Régulation du commerce





Mon habitation a été construite en 1972 ; une grande partie a été aujourd'hui modifiée, agrandie, rénovée par moi-même. La surface à chauffer est aujourd'hui de 160 m².

Elle se trouve sur un petit terrain de 550 m², situé dans un lotissement soumis à un règlement d'urbanisme (au sud de la Loire) très strict : il impose les tuiles, leur couleur, leur forme, la pente du toit, les appuis de fenêtres et la couleur des enduits. Il est impossible d'opérer une modification de toiture non prévue à l'origine – ce qui empêche l'installation de capteurs qui devraient être en saillie par rapport à la toiture.

Les critères d'isolation d'alors seraient aujourd'hui impensables : il n'y avait pas d'isolation entre le parpaing (de 15 cm) et la brique, le plafond était en placoplâtre sans isolation, la toiture reposait sur des fermettes, sans voliges, les portes et les fenêtres étaient en bois à simple vitrage. Le chauffage central monotube, comprenant des convecteurs en tôle d'acier et une chaudière murale à gaz propane, de qualité médiocre, s'est vite révélé un gouffre à calories, tout en étant inefficace l'hiver.

A alors commencé un long processus de réflexion et d'amélioration de l'isolation et du chauffage de mon habitation, processus qui plus de 20 ans plus tard m'a conduit à mettre en place mon installation solaire.

En 1979, j'ai construit une cheminée à foyer ouvert. J'y ai incorporé un récupérateur à production d'eau chaude, que j'ai raccordé au circuit monotube du chauffage central. Cette installation à foyer ouvert n'avait alors qu'un intérêt de plaisir, la consommation énergétique et son coût n'étaient pas à l'époque une préoccupation majeure (je disposais d'un petit stock de bois de chauffage issu des arbres trop encombrants de mon terrain).

J'ai continué, en fonction de mes disponibilités financières, à entreprendre de

Quelques mots sur l'autoconstructeur

Âge : 64 ans.

Formation : CAP Serrurier, CAP Dessin, Bac pro Mécanique générale (à 39 ans), BT Construction aéronautique.

Profession : en apprentissage à 13 ans et demi, ouvrier métallurgie, bâtiment, formeur-coque en construction navale, tuyauterie industrielle, soudeur en construction navale et pétrole, serrurier, forgeron, mécanicien, usineur (tour, fraiseuse, rectifieuse, et sur les premières machines-outils à commandes numériques), ajusteur, dessinateur en mécanique générale, technicien d'atelier en construction aéronautique.

Intérêts particuliers : bricoleur polyvalent ; électronique, informatique, botanique (orchidées), aquariophilie, voile, pêche au bar au leurre manié.

nombreuses modifications pour essayer de modérer les nombreuses pertes d'énergie.

- Une mousse urée-formol a été injectée entre les murs porteurs et les cloisons de briques plâtrières.
- De la laine de roche a été projetée sur les combles, à l'aide d'un puissant ventilateur. Je suis depuis ce jour devenu allergique à ce produit, trop souvent manipulé sans protection. Il n'y avait pas à l'époque de réflexion écologique concernant ce type de produit.
- Toutes les ouvertures en bois ont été remplacées par des portes et des fenêtres à double vitrage, en PVC.
- Un épais enduit a été ajouté sur l'extérieur des murs.

En 1992, j'ai entamé une collection d'orchidées tropicales dans ma véranda, puis dans une petite serre que j'ai équipée en chauffage par une seconde chaudière murale et trois radiateurs en fonte. Cette passion a provoqué une prise de conscience du coût des énergies : en 1993, la note de gaz propane était particulièrement élevée : 3 350 € pour alimenter par citerne la table de cuisson de la cuisine et les deux chaudières (l'une produisant le chauffage de la serre et l'autre le chauffage de la maison et l'eau chaude sanitaire).

J'ai alors envisagé de remplacer ces deux chaudières par une seule à basse température, en chauffage seul, à double circuit. Le second circuit est prévu pour un plancher chauffant destiné à la serre, par l'intermédiaire d'une bouteille de mélange (petit réservoir de répartition que l'on nomme aussi casse-pression) et d'une vanne trois voies motorisée gérée par une régulation avec sonde de départ, sonde extérieure, et sonde d'ambiance dans la serre. Pour ce circuit, je me suis appuyé sur un schéma d'alimentation de plancher chauffant.

J'ai monté tous les circuits avec des tubes en cuivre de 28 mm isolés par de la gaine en mousse Armaflex. Ce produit composé à 100 % de mousse de caoutchouc de 19 mm d'épaisseur est d'un prix plus élevé à l'achat que beaucoup d'autres isolants destinés aux tuyauteries. Il a démontré depuis longtemps son efficacité d'isolation auprès des professionnels.

Pour rejoindre la serre, la tuyauterie et son isolation ont été glissées dans de la gaine annelée de 100 mm, enfouie sous 60 cm de terre, entre la chaufferie de la maison et la serre distante de 10 m. L'eau chaude sanitaire est produite, en heure creuse, par un cumulus de 200 l sur-isolé, installé dans les combles.

La totalité de ces installations n'a été financièrement possible qu'en 1998. Le vieux circuit de chauffage a été remplacé par un circuit bitube en parapluie, alimentant des radiateurs en fonte surdimensionnés. Cela m'a permis d'obtenir une température de confort, avec une production d'eau ne dépassant pas 45 °C. Cette importante modification a aussi généré une économie substantielle, d'environ 1 500 € la première année.

Ces travaux se sont toutefois avérés insuffisants. Avant la construction de la serre, mes consommations annuelles en propane variaient de 2 300 à 3 200 l selon la saison – preuve que l'isolation était insuffisante. La serre, nouvelle source de dépense d'énergie, a relevé la consommation de gaz propane jusqu'à 3 600 l en 1998, auxquelles s'ajoute la location annuelle d'une citerne d'environ 210 €. Cela m'a décidé à terminer les modifications prévues.

L'équipement sur une seule chaudière avec régulation a fait baisser la consommation de près de 800 l sur l'année 1999. Mais un degré supplémentaire programmé dans la serre l'hiver suivant, pour le confort des plantes, a relevé la consommation de 400 l.

En janvier 2003, j'ai équipé le foyer de la cheminée d'une porte de grande marque, sur mesure, avec vitrage céramique. Cet équipement s'est révélé être une erreur de 900 € – aussi cher qu'un insert. J'ai dû en outre reprendre toute la partie métallique à cause de nombreuses malfaçons du produit. Toutefois, grâce à cette porte, j'utilise la cheminée même la nuit, sans crainte de projection de braise, avec du bois de démolition que l'on me donne. Cet équipement me permet d'abaisser la consommation de gaz à 2 400 l pour l'année 2003, et 2 100 l en 2004. Après l'installation du premier capteur solaire en 2004, la consommation de propane s'est réduite à 1 950 l en 2005, soit une diminution de 8 % environ, puis à 1 000 l en 2006 suite à la dernière modification de l'installation solaire

En 2004, je recherche sur Internet une solution d'économie de gaz propane dans de nombreuses directions : insert, pompe à chaleur, isolation extérieure, nouvelles chaudières, etc. Je découvre le site de Pierre Amet qui présente, avec beaucoup de détails et d'explications, les techniques de base et ses expériences d'autoconstructeur. Ce site est le seul, parmi ceux que j'ai visités, qui démontre l'intérêt d'utiliser les systèmes solaires thermiques tels qu'ils sont proposés pour le seul usage de l'eau chaude sanitaire, en les modifiant pour le chauffage d'une habitation.

La dépense d'eau chaude sanitaire ne représente que 10 % de celle du chauffage d'une maison, et moins encore en allant vers des régions froides. Tout le territoire français ne bénéficie pas de l'ensoleillement constaté sur la région PACA, néanmoins, contrairement aux idées reçues – et aux commerciaux qui veulent écouler leurs stocks de chaudières au fioul ou aux installateurs qui ne connaissent pas ces systèmes –, l'énergie solaire reste très rentable dans les régions où les hivers sont longs ou sombres : la

plus faible rentabilité solaire est compensée par la durée de son utilisation.

Autre certitude : après un hiver 2006/2007 très pluvieux, je ne considère pas l'installation solaire comme énergie principale, mais plutôt comme un complément aléatoire. D'autant plus que j'ai le souvenir de rares hivers rigoureux et ensoleillés et d'une majorité de périodes hivernales sombres, avec peu de journées ensoleillées.

Premiers schémas de principe

En me basant sur les réalisations de Pierre Amet et en tenant compte de ce que j'avais réalisé – le couplage de ma chaudière avec mon foyer à bois, ainsi que l'ajout de la bouteille de mélange alimentant la serre en chauffage –, j'ai commencé à imaginer quelques schémas de circuits cumulés : les premiers schémas allaient être pour le chauffage en hiver, l'eau chaude sanitaire en été.

Une consultation régulière sur Internet m'a convaincu d'un élément important : choisir des capteurs adaptés à la configuration particulière de ma maison.

- Le toit à faible pente est défavorable pour un capteur plan en hiver.
- L'obligation de respecter le règlement d'urbanisme et le cahier des charges du lotissement de zone résidentielle pavillonnaire interdisent une installation érigée sur un toit.

Choix de la technologie

J'ai opté pour des capteurs à tubes sous vide, à effet thermos, qui présentent l'avantage d'apporter en hiver un rendement suffisant sur un toit avec une pente à 25°, avec un ballon solaire contenant 300 l de réserve d'eau sur une hauteur de 1,82 m et 0,60 m de diamètre.

Ces capteurs, dont la technologie est vieille de 40 ans, sont déjà utilisés dans de nombreux pays. Mais, en 2004, les distributeurs en chauffage sanitaire auxquels je me suis adressé ignoraient son existence.

Il existe différents types de tubes sous vide, correspondant à des utilisations souvent fort différentes.

Capteur à tube à circulation directe

Issu de l'amélioration du capteur plan, il comprend un tube caloporteur nu dans lequel l'eau circule. Ce système ne permet pas le démontage d'un tube pendant son fonctionnement.

Ce procédé est le plus ancien, il ne comprend qu'un seul tube de verre soumis au vide après la mise en place du caloporteur. Il est très fragile à la tenue au vide. Les marques sont Cortec fabriqué par Giordano, Vitosol distribué par Viessmann.

Étant donné les prix de ce type de capteur, leur fragilité et la nécessité de stopper l'ensemble en cas de casse d'un tube, je les ai d'emblée écartés.

Capteur à tubes sous vide à caloporteur

Contrairement aux précédents, ces capteurs comportent deux tubes sous vide soudés entre eux, et assurent une très bonne tenue au vide dans le temps. Dans le tube central, le système caloporteur est inclus et bloqué par contact mécanique entre acier et verre, occasionnant souvent une légère perte thermique et une fragilité à la jonction mécanique. De plus, le liquide dans le caloporteur nécessite une légère inclinaison des tubes pour le fonctionnement optimal de l'ensemble. Il s'agit d'un procédé développé par le fabricant Thermomax qui le distribue dans le monde entier.

Capteur à tubes sous vide à effet thermos

Il s'agit du système le plus évolué et le plus simple, mis au point à l'université de Sydney. La Chine fabrique 5 millions de mètres carrés de ce type de capteur par an.

L'enveloppe interne est recouverte par un traitement sélectif absorbant le rayonnement solaire, sans émettre hors de ces tubes le rayonnement infrarouge. Ce système ne comporte pas de contact direct entre le verre et le métal, supprimant ainsi les pertes d'étanchéité et de convection.

Le caloduc contient un liquide dont un certain pourcentage d'acétone. Il supporte n'importe quelle position du capteur, à plat ou vertical, lui permettant d'être exposé dans des situations difficiles avec un bon rendement en hiver, par faible luminosité. C'est particulièrement intéressant pour les toits à faibles pentes.

Autre avantage, le remplacement de tube se fait sans arrêt du circuit, par simple emboîtement.

La simplicité de ce système de bon rendement a permis une baisse notoire du coût de fabrication et surtout du prix de vente. On peut penser ici que le moins cher est le meilleur !

De nombreux fabricants de systèmes solaires utilisent ce procédé actuellement, en y apportant une touche personnelle et une grande plus-value (en France, ce sont les capteurs T-11 CPC distribués par Solaire Connexion).

Les réflecteurs CPC *(Compound Parabolic Concentrator)* sont courants avec ces types de capteurs, car la partie face au soleil et la réflexion couvrent par rayonnement la totalité de l'absorbeur du tube interne, garantissant ainsi un meilleur rendement.

Pour trouver ce type de capteurs à des prix intéressants, mieux vaut s'adresser à

des importateurs (Soleil + par exemple, ou le groupement d'achat Apper) qu'à des fabricants, qui peuvent obliger à acheter la totalité du matériel auprès d'eux, ou à faire appel à un installateur qui leur est lié.

Ce sont ces différences qui ont motivé mon choix, j'ai donc retenu ces capteurs pour mon installation.

Capteur à tubes sous vide « Schott »

Fabriqués par Schott-Rohrglas en Allemagne pour les foyers de capteurs à concentration, ils forment un genre de gigantesque parabole en ligne, permettant l'utilisation de la totalité de la surface cylindrique du tube pour une capture de hautes températures. Ce principe en constante évolution, basé sur la technologie thermos est utilisé pour des installations industrielles ou des productions thermiques à grande échelle (centrales solaires au Nevada et en Andalousie).

Schott est une importante entreprise œuvrant sur toutes les technologies solaires thermiques et photovoltaïques.

Cette entreprise offre une adaptation de capteur « grand public » où chaque tube et l'ensemble du capteur peuvent fonctionner en thermosiphon[1].

Offre des constructeurs

J'ai sollicité plusieurs fabricants. Certains m'ont guidé vers des monteurs affiliés et/ou m'ont proposé un devis de travaux et de coût de matériel exorbitant, sans aucun rapport avec l'amortissement espéré pour un appoint au chauffage.

La plupart offrent surtout la seule possibilité de chauffe-eau solaire, solution absolument pas rentable par rapport à un cumulus branché en heures creuses, si ce n'est l'aspect écologique de la démarche.

Une offre commerciale d'un ancien agriculteur, reconverti en importateur et nouvellement installé, m'a fait franchir le pas avec la commande d'un capteur de vingt tubes sous vide à effet thermos, de 1,50 x 1,50 m, facile à poser, sans avoir besoin d'effectuer des modifications, que ce soit sur une toiture, une terrasse, un pignon de maison ou au sol.

Les divers dossiers commerciaux que j'ai reçus, pour la seule technologie de chauffe-eau sanitaire solaire, préconisent le même principe d'installation : un apport de la chaudière ou de résistances électriques pour compenser le manque d'ensoleillement, souvent en direct, sans mécanisme de vanne trois voies ou d'autres accessoires.

Ces schémas de principe m'ont inspiré pour imaginer le mien, en vue d'une installation en appoint au chauffage.

Principe de l'installation

Si un échangeur permet de chauffer l'eau chaude sanitaire, pourquoi ce même échangeur ne permettrait-il pas de soulager la chaudière en préchauffant l'eau du circuit de chauffage par l'apport de l'énergie solaire (figure 8.1) ? Dans le cas d'une absence d'énergie solaire apportée, le ballon se comporte en ballon de stockage pour l'énergie de la chaudière.

Cette démarche s'inscrit dans le cadre d'une technique de chauffage basse température, technique permise grâce au surdimensionnement des radiateurs en fonte installés dans chaque pièce.

Avec une température maximale de sortie de l'eau à la chaudière de 45 °C, l'appoint solaire, avec une eau du ballon avoisinant cette température, doit permettre une modération de dépense de l'énergie gaz.

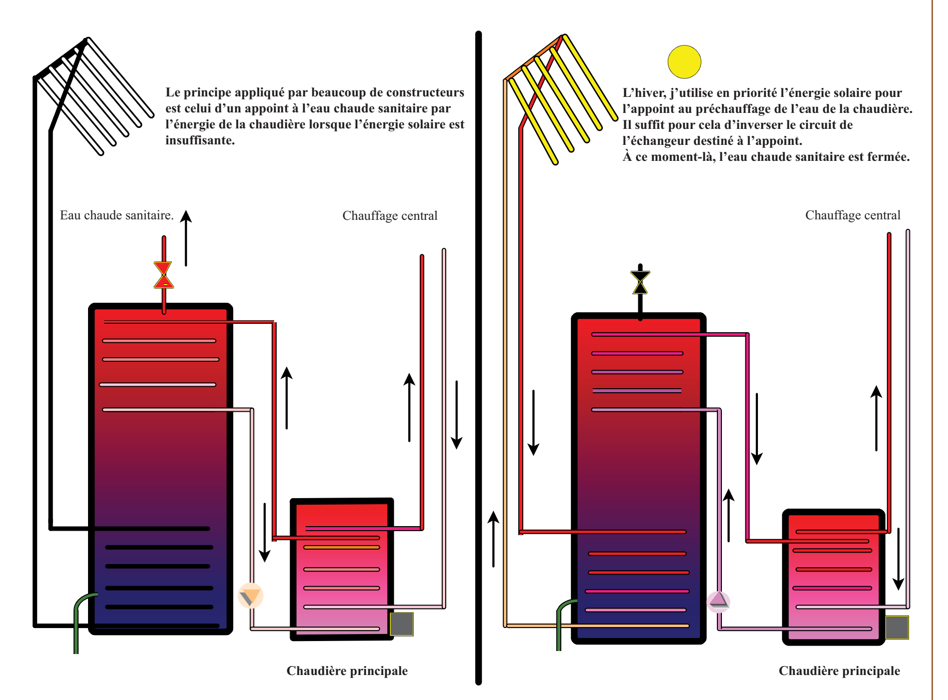


Figure 8.1
Les schémas de la modification pour l'utilisation de l'appoint.

1 Voir diverses réalisations sur www.schott-pictures.net.

Je dois admettre aujourd'hui que je n'avais pas pensé à l'époque pouvoir économiser autant d'énergie avec ce projet.

Le choix du ballon de stockage et de la régulation a été plus difficile, malgré le nombre de propositions.

Le ballon de stockage de 300 l à deux échangeurs, acheté en 2003 par P. Amet, répond à mes besoins. Son encombrement correspond à l'espace disponible dans la pièce destinée à son emplacement. Le prix a subi une hausse d'environ 30 % en un an, cette augmentation correspond à l'offre de crédit d'impôt nouvellement mise en place en 2004 pour l'achat de ces « nouveaux produits ».

Avant de me lancer, je me suis renseigné auprès de plusieurs artisans plombiers-chauffagistes que je connaissais afin de collecter quelques renseignements. Pour la totalité d'entre eux, le solaire n'est pas rentable dans notre région.

Un seul m'a affirmé pratiquer cette technologie pour de grands ensembles d'immeubles, dans des administrations publiques. Le projet que je lui ai présenté (figure 8.2) lui semblait aberrant : « Tu vas alourdir la demande de ta chaudière », « Cela ne t'apportera rien, c'est ta chaudière qui va chauffer l'extérieur ! » et surtout « Ton tube de cuivre pour le solaire (que je prévoyais en 12/14) est trop petit, tu auras trop de perte de charge, moi je ne mets que du diamètre 22 ».

Les deux premières remarques ne sont pour moi que la réaction du professionnel non sollicité pour ce projet.

Comme c'est lui qui m'avait vendu la chaudière, il savait qu'elle était prévue pour 23 kW et ne pouvait être fatiguée par l'ajout de l'échangeur du ballon solaire, à forte inertie. Le branchement sur le récupérateur de la cheminée était une source de perturbations d'une toute autre valeur, avec des pics de température importants. Grâce au vase d'expansion et à la faible pression dans le circuit, les températures instables de la cheminée ont toujours été bien supportées par la chaudière.

Sa deuxième réflexion m'a étonné car le plan montrait clairement que les clapets anti-retour et l'anti-siphon ne pouvaient en aucun cas permettre la dispersion des calories du ballon vers le capteur.

La troisième remarque, concernant le diamètre du tube de cuivre pour le solaire, me posait problème. J'ignorais précisément la signification de l'expression « perte de charge ». Je n'avais alors que peu de connaissances techniques sur les calculs des calories, les pertes de charges, la stratification et tous les autres éléments à prendre en compte pour le meilleur compromis entre la demande et le résultat obtenu.

Cela a été pour moi une période de doutes, vite repoussés par la nécessité de diminuer ma facture de gaz. Bien après l'installation terminée, les forums de discussion sur le solaire m'ont appris beaucoup sur ces éléments. On verra que ce professionnel se trompait.

Sur ses conseils, j'ai utilisé des tuyauteries en cuivre de gros diamètre. Ce n'était pas la bonne solution par manque de perte de charge : l'eau n'avait pas le temps de chauffer. J'ai donc dû changer les tuyaux, ce qui a augmenté le coût estimé de l'installation.

Ce professionnel s'est engagé à me fournir le ballon et la régulation avec une petite partie de la remise que la filière accorde généreusement aux distributeurs, aux commerciaux et aux installateurs professionnels pour ces produits. Cet accord ne s'est pas effectué sans difficulté car les fabricants utilisent de plus en plus des installateurs exclusifs pour la commercialisation de leurs produits. Mon partenaire providentiel a dû batailler ferme pour obtenir l'achat du ballon et de la régulation, sans la totalité du lot « indissociable » proposé par le fabricant.

Après un mois d'attente pour la livraison, j'ai été contacté par le distributeur me signalant l'endommagement de l'emballage du ballon à la réception. Il m'incite alors à refuser ce produit car le revêtement vitrifié des échangeurs est fragile, sa garantie étant compromise en cas de choc ou de transport dans une mauvaise position. Le ballon doit toujours voyager dans la position debout verticale.

Il m'a fallu attendre huit jours supplémentaires et louer un transport avec plateau élévateur pour recevoir ce produit du dépositaire à mon domicile.

Coût de cette première version

L'achat du cuivre en barres de 3 m, les coudes, raccords à souder, raccords mécaniques, raccords bicônes pour les capteurs, les clapets anti-retour, vannes, vanne trois voies motorisée, le circulateur, les purgeurs automatiques, le bloc mano-soupape, le vase d'expansion, le glycol du circuit solaire, la régulation, le ballon et le premier capteur ont un coût approximatif de 2 500 € pour cette première installation. Ce prix est sans compter le matériel et l'outillage déjà à ma disposition.

Déroulement des travaux

Installation du capteur et de l'échangeur

Le capteur à tubes est composé d'un récepteur, d'un cadre en inox et de vingt tubes sous vide (à emboîter dans le récepteur lorsque le circuit est opérationnel). Il a été très facile à poser sur la toiture.

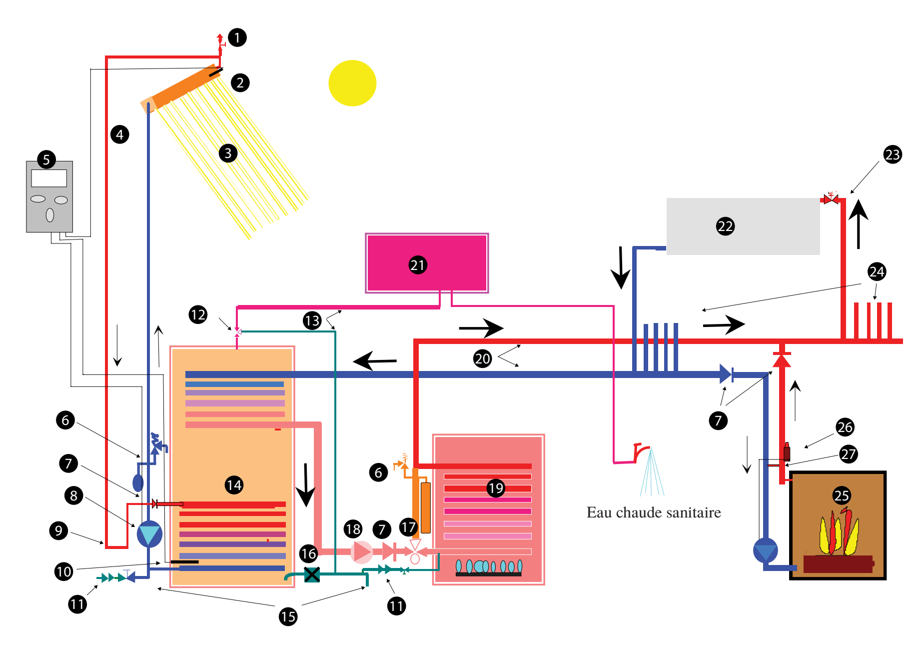


Figure 8.2
Schéma de principe du circuit solaire.
❶ Purgeur automatique au-dessus d'une vanne, le tout placé aux points les plus hauts du circuit. ❷ Sonde PT2000 (TC) pour la température de l'eau en sortie du capteur. ❸ Capteurs à tubes sous vide posés sur la toiture. ❹ Circuit solaire en tube de cuivre recuit de 8/10 assemblé par raccords mécaniques. ❺ Régulation du commerce pour la gestion du circulateur. ❻ Groupe sécurité du circuit avec mano-soupape et vase d'expansion. ❼ Clapet anti-retour. ❽ Circulateur géré par la régulation. ❾ Anti-siphon d'une hauteur de 10 fois le diamètre de la tuyauterie, le retour vers le capteur. ❿ Sonde PT 1000 (TS) pour la température en entrée du ballon. ⓫ Double clapet anti-retour, suivi de vanne de remplissage. ⓬ Vanne trois voies manuelle, pour l'eau sanitaire en sélection été/hiver. ⓭ Circuit sanitaire en tube de cuivre écroui 12/14. ⓮ Ballon solaire à deux échangeurs et volume sanitaire. ⓯ Circuit sanitaire et de remplissage. ⓰ Groupe sécurité du ballon solaire. ⓱ Vanne trois voies motorisée gérée par thermostat. ⓲ Circulateur du circuit chauffage. ⓳ Chaudière à gaz. ⓴ Circuit chauffage en tube de cuivre écroui de 26/28. ㉑ Cumulus électrique en série du ballon solaire pour le sanitaire. ㉒ Radiateurs surdimensionnés pour une température de production entre 35 et 45 °C. ㉓ Robinets thermostatiques, sauf sur un radiateur. ㉔ Autres radiateurs. ㉕ Cheminée à « bouilleur ». ㉖ Sonde thermostatique déclenchant le circulateur de la cheminée. ㉗ Bi-pass de sécurité.

Vissée sur l'encadrement du capteur, à chaque coin, une petite bande en tôle d'inox a été glissée sous une tuile pour s'accrocher sur les liteaux de la charpente. Le poids de la tuile en béton rend possible ce procédé.

Les tubes du circuit passent par l'ouverture élargie d'une tuile d'aération (appelée aussi tuile chatière). Les sorties du récepteur, en tube de cuivre de 20/22 recuit, sont reliées mécaniquement au circuit en tubes de même diamètre par deux doubles raccords bi-cônes. Ils remontent légèrement sous la toiture afin de constituer deux points hauts sur lesquels sont assemblées, par des tés, des vannes surmontées de purgeurs automatiques (repère ❶ du schéma de principe, de la figure 8.2).

Les tubes ❹, fixés sur le mur intérieur du pignon, plongent ensuite vers la chaufferie, l'aller au capteur en dessous et le retour chaud au-dessus.



Figure 8.3
On voit ici l'une des six petites bandes d'acier inox qui maintiennent le premier capteur à sa base en passant sous la tuile.



Figure 8.4
Sous la toiture, la même bande d'inox crochète un tasseau de la charpente.

L'eau chaude solaire arrive directement à la partie haute de l'échangeur placé à la base du ballon, après avoir transité dans « une boucle » appelée anti-siphon ❾. Celle-ci est d'une hauteur minimale correspondant à 10 fois le diamètre du tube, soit, dans le cas d'un tube de cuivre de 8/10, 100 mm au minimum. Sur la figure 8.6, on voit qu'il faut un minimum de 220 mm avec un tube de 20/22. Ce dispositif précède un clapet anti-retour ❼. Tout cet ensemble est destiné à empêcher le liquide du circuit d'amorcer, à l'arrêt du circulateur ❽, une remontée des calories vers le capteur ❸.

Après le clapet anti-retour, une vanne est positionnée. Une vanne manuelle est placée à chaque entrée et sortie du ballon – soit six au total.

Le tube inférieur de l'échangeur solaire, froid à la sortie du ballon, après la vanne, amorce une remontée et arrive aussitôt sur un té où une petite vanne est positionnée pour le remplissage de l'antigel, à l'aide d'une pompe manuelle ou pour la vidange ⓫.

Le tube continue vers le circulateur (8) en passant par un dispositif comprenant une soupape trois bars surmontée d'un manomètre ❻.

Au bout de la soupape, une tuyauterie en 8/10 est disposée afin d'évacuer une possible surpression. Dans le prolongement de la soupape, on trouve un té dont une des branches est une arrivée d'eau du réseau, alimentée par un double clapet anti-retour (en dessous du circulateur sur le schéma). Sur l'autre branche du té, une fine tuyauterie 6/8 est reliée au vase d'expansion. Il réagit à la dilatation due aux variations de température du liquide caloporteur.

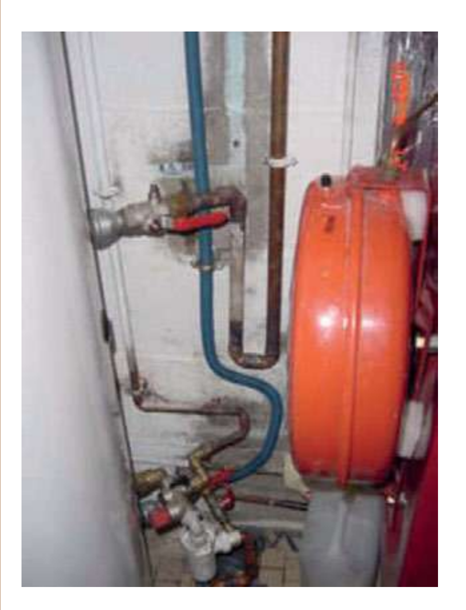


Figure 8.5
Les numéros renvoient au schéma de principe, figure 8.2, p. 91. À gauche, le ballon solaire ⓮ avec, de haut en bas : l'arrivée du capteur sur l'anti-siphon ❾, une vanne avec purgeur manuel ; en dessous, l'arrivée sanitaire du réseau sur le bloc sécurité ⓯ et son évacuation, pour la vidange ; en dessous encore, le retour du circuit solaire ❹ en 8/10 (toute cette installation concerne le début des modifications). À droite, le vase d'expansion du circuit solaire et celui du chauffage ; et en dessous, la récupération du liquide caloporteur solaire, issue du bloc mano-soupape de sécurité ❻.

Plus haut, il y a le circulateur et la continuité du circuit vers le point haut.

Installation de la régulation

À ce système, il faut ajouter la régulation.

Celle-ci est reliée à une sonde PT1000 de 6 mm de diamètre, implantée dans le doigt de gant prévu côté sortie du récepteur du capteur (repère ❸ du schéma de principe, p. 91). Le câble de la sonde mesure 1,50 m ; toujours trop court, il peut être rallongé avec un câble de 0,75 mm^2 jusqu'à une longueur de 50 m, et avec un câble de 1,5 mm^2 (torsadé) jusqu'à 100 m.

Il ne faut pas faire voisiner ce câble avec un câble secteur.

La sonde du capteur rejoint la borne dédiée de la régulation ❺.

À la base du ballon, une autre sonde PT1000 spécifique avec une gaine se loge dans le doigt de gant ❿ et rejoint aussi la régulation dans les bornes dédiées ❺.

L'alimentation 220 V du circulateur ❽ par un câble deux fils + terre de 1,5 mm^2, rejoint la régulation ❺ sur une borne dédiée.

Enfin, la régulation est alimentée par un câble identique au tableau électrique via un disjoncteur 2 A.

En haut, le schéma d'un circuit avec une vanne trois voies motorisée pour une régulation de la sortie d'eau sanitaire en chauffage sanitaire individuel seul.

En bas, pour une utilisation simple par le circulateur ❽, les sondes de sortie du capteur ❸ et de bas du ballon ❿.

À côté de la régulation, j'ai ajouté un boîtier comportant trois compteurs horaires (figure 8.6). Ils permettent la comptabilité des heures de fonctionnement du circulateur et des consommations horaires de gaz, pour la chaudière et pour la serre. La consommation de la chaudière en gaz propane étant de 1,95 kg/h, il est facile de calculer précisément les dépenses d'énergie du chauffage de la maison ou de la serre.

Comme tout circuit électrique travaillant avec une possible humidité, il est prudent de sécuriser tout l'ensemble (chaudière, cumulus, solaire) par un disjoncteur différentiel 40 A/30 mA (figure 8.7).



Figure 8.6
Le boîtier de la régulation.



Figure 8.7
Pour sécuriser l'utilisation sanitaire, un disjoncteur différentiel de 30 mA est placé sur le circuit électrique de l'installation solaire, de la chaudière et de la cheminée ; il protège tous les accessoires de régulation, les circulateurs, les vannes motorisées et les régulations.

Raccordement de l'ensemble

Pour compléter l'installation, il faut relier en série le circuit chauffage (repère 1 du schéma de principe, p. 91) à l'échangeur d'aide au chauffage.

Ici, le retour froid des radiateurs ㉒ a été détourné du bas de la chaudière ⓳ pour être relié à l'entrée haute de l'échangeur haut du ballon ⓮, en passant par un clapet anti-retour ❼ et la vanne manuelle.

La sortie basse de cet échangeur passe par la vanne et rejoint le bas de la chaudière sans autre modification.

Enfin, pour terminer l'ensemble, le circuit sanitaire arrive à la base du ballon par le bloc sécurité (⓰ – figure 8.8), qui permet d'évacuer l'eau en cas de surpression et de vidanger le ballon.

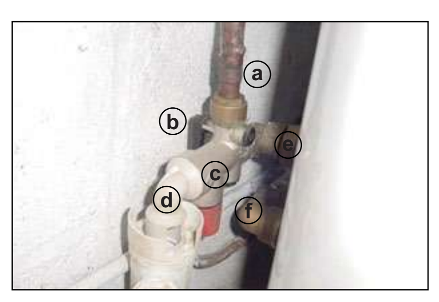


Figure 8.8
Derrière le ballon, le bloc sécurité (vue de gauche).
ⓐ L'arrivée de l'eau du réseau. ⓑ Vanne d'arrêt. ⓒ Soupape de sécurité 7 bars.
ⓓ Évacuation de sécurité ou vidange.
ⓔ Entrée du circuit sanitaire dans le ballon.
ⓕ En dessous, l'entrée de l'échangeur solaire.

Avant le bloc sécurité et afin de différencier l'aide au chauffage l'hiver et l'eau chaude sanitaire d'avril à octobre, un té suivi d'une vanne simple dévie l'eau du réseau en dehors et vers le sommet du ballon, où une vanne trois voies manuelle ⓬ fait la sélection hiver/été.

Par le bloc sécurité, l'eau remplit le ballon et ressort au sommet par un raccord diélectrique (figure 8.10). Cet élément, composé de deux raccords acier séparés par une bague isolante en nylon, est obligatoire depuis quelques années à la sortie chaude des cumulus électriques. Il permet de limiter le couple électrolytique (la corrosion) provoqué par le contact entre l'acier et le cuivre, et accentué par le calcaire constamment renouvelé, à la sortie d'un circuit sanitaire.



Figure 8.9
Bloc sécurité (vue de droite). ⓐ Entrée du circuit sanitaire dans le ballon. ⓑ Entrée du circuit solaire dans l'échangeur. ⓒ Vanne de remplissage et de vidange du glycol du circuit solaire par la pompe spécifique.



Figure 8.10
La sortie du ballon.
ⓐ Raccord diélectrique. ⓑ Au-dessus du raccord, la vanne de sortie du ballon est presque fermée l'hiver pour donner la priorité à l'aide au chauffage. ⓒ La vanne trois voies manuelle est réglée pour un mélange de l'alimentation du cumulus. ⓓ En dessous, la vanne simple amène l'hiver l'eau froide dérivée du bloc sécurité de la base du ballon, pour l'alimentation directe du cumulus électrique.

Le raccord diélectrique est suivi d'une simple vanne manuelle servant à renforcer la priorité été/hiver, déterminée par la vanne trois voies manuelle.

Risque de légionellose

En hiver, la sortie du sommet du ballon vers la vanne trois voies manuelle n'est pas totalement fermée par la vanne simple pour ne pas favoriser le risque de légionellose de l'eau confinée dans le ballon. Pour les mêmes raisons, en été, l'arrivée froide n'est pas totalement fermée par la vanne simple de la tuyauterie dérivée du bloc sécurité.

De la sortie de la vanne trois voies manuelle, l'eau sanitaire rejoint en série l'entrée froide du cumulus électrique, équipé lui aussi d'un bloc sécurité.



Figure 8.11
Double clapet anti-retour. Il s'agit du modèle permettant le remplissage des circuits chauffage et solaire par l'eau du réseau.

Petit conseil : pour le remplissage du circuit solaire et du circuit chauffage par l'eau du réseau, interposez un double clapet anti-retour. Vous éviterez ainsi que l'eau de ces circuits ne se mélange et ne pollue l'eau du réseau en cas de fausse manœuvre (figure 8.11).

Isolation des circuits

Tout comme l'isolation d'une maison est indispensable pour limiter les dépenses de chauffage, une isolation maximale s'impose pour véhiculer les précieuses calories et conserver le plus longtemps possible cette énergie. J'ai donc utilisé un produit de bonne qualité : des gaines en mousse de caoutchouc épaisses de 19 mm, quel que soit le diamètre de la tuyauterie à protéger. Cette gaine, de marque Armaflex, existe sous deux formes : fendue avec des lèvres autocollantes ou entières à enfiler.

L'utilisation de gaine en mousse de polyuréthane ainsi que certaines gaines en mousse caoutchouc de faible épaisseur peut s'avérer désastreuse en isolation. Pour ces produits, il s'agit de mauvaises mesures d'économie qui ne doivent pas l'emporter sur l'efficacité (figure 8.24).

Le coût du modèle ouvert est 30 % plus élevé que celui du modèle fermé, qui se découpe très bien au cutter. J'utilise un scotch plastique aluminisé de 50 mm de large pour refermer l'ensemble. Ce scotch est aussi indispensable pour les courbes, les tés, les clapets et autres accessoires.



Figure 8.12
Utilisation d'une isolation de qualité.



Figure 8.13
Les circuits solaire et d'apport d'eau de la soupape de décharge sont bien isolés dans les combles, pour éviter la perte d'énergie et le gel.

Trois circuits dissociés sont à éprouver : le circuit solaire, le circuit chauffage et le circuit d'eau chaude sanitaire.

Mise en eau du circuit solaire

Le circuit solaire est celui qui contient le moins de liquide, mais il ne faut pas oublier que, dans la plupart des situations, un additif antigel doit être incorporé dans une proportion relative à l'intensité moyenne du gel régional. Pour les quantités à mélanger, il faut se reporter aux recommandations inscrites sur l'emballage du produit.

J'ai donc, pour l'ajout de l'antigel, placé sur un té fileté un branchement par une petite vanne manuelle et un raccord fileté qui s'adapte à une pompe spécifique équipée d'un bac (figure 8.14). On verse l'antigel dans ce bac pour l'injecter sous pression dans le circuit. On ajuste la pression définitive avec l'eau de ville, en ouvrant la vanne qui suit le double clapet anti-retour, jusqu'à la pression désirée, affichée sur le manomètre associé à la soupape trois bars.



Figure 8.14
Cette pompe, équipée de son bac de dépôt pour l'antigel, permet de monter en pression jusqu'à 45 bars, ce qui permet de faire des tests d'étanchéité. Dans notre cas, 4 bars suffisent pour éprouver la sécurité des soupapes avant le remplissage définitif.

Rappel

Une pression de 1 bar est nécessaire lorsque le circuit a une hauteur de 10 m.

Je situe la hauteur maximale de ce circuit à moins de 4 m (du bas de l'échangeur solaire au haut du capteur). J'ai limité la pression à 0,60 bar, ce qui laisse une grande souplesse au vase d'expansion en cas de dépassement important de température.

Pour les essais, j'ai rempli à l'eau claire le circuit à la limite de pression du réseau. Puis, avec de l'eau versée dans le bac de la pompe à antigel, j'ai fait monter la pression à plus de 3 bars pour vérifier les fuites occasionnelles et le fonctionnement de la sécurité par la soupape et son évacuation.

Ces essais sont précédés par un rinçage de tous les circuits, ce qui évite que de minuscules copeaux de cuivre, de résidus de calamines ou de boues issus des sciages et soudures détériorent les vannes ou d'autres accessoires. Les essais ainsi

que le fonctionnement du circulateur en direct sur une prise du secteur ont été faits, bien sûr, avant la pose des mousses d'isolation.

Circuit chauffage

Le circuit chauffage, avec la purge des radiateurs et l'écoute du circuit dans l'échangeur du ballon pour détecter la présence d'air, a nécessité la pose, après essai, d'un purgeur manuel à l'entrée. J'ai donc changé une vanne par une autre pourvue de cet accessoire.



Figure 8.15
Un clapet anti-retour placé avant la vanne équipée d'un purgeur manuel (choisi pour cause de manque de place) empêche l'énergie de s'échapper à l'arrêt du circulateur.

À savoir

Lorsqu'il y a une forte dénivellation sur un point haut, il est très difficile, voire impossible, d'éliminer la présence d'air dans un circuit d'eau en boucle sans un purgeur manuel ou automatique.

Circuit d'eau chaude sanitaire

Le rinçage du ballon puis son remplissage ne présentent pas de difficulté particulière. Pour éviter d'incorporer 300 l d'air par le circuit sanitaire, le raccord diélectrique du sommet du ballon n'est resserré qu'après le remplissage total du ballon et son début de débordement.

Ce circuit n'exige pas de purgeur, l'eau étant constamment renouvelée sous pression. En revanche, une ouverture progressive de la robinetterie de la salle de bains et de la cuisine est indispensable pour l'évacuation en douceur de l'air accumulé dans la tuyauterie reliant le ballon solaire au cumulus électrique.

Montage des tubes sous vide dans le récepteur

L'installation des tubes se fait par étapes.

- On enrobe les extrémités en cuivre du tube et du logement dans le capteur avec une pâte silicone de contact thermique, résistant à 250 °C (chez Radiospares[2] par exemple, en tube de 100 g, livrable partout en France).
- Le tube est assemblé dans son logement, en commençant par le milieu du capteur pour ne pas risquer de casse en chevauchant les tubes déjà montés.
- On fixe chaque tube à l'extrémité basse du châssis à l'aide d'un collier mécanique inox sur l'embout en silicone. Le collier doit être refermé sans serrage excessif (figure 8.16).



Figure 8.16
Fixation des tubes à leur base.

- Enfin, le tube posé est nettoyé avec un chiffon doux pour éliminer les traces de silicone, de doigts ou les poussières résiduelles.

Les dangers d'une rapide montée en température

Le positionnement des tubes sous vide dans le récepteur ne peut être effectué que lorsque les circuits sont fonctionnels.

Si le circuit solaire n'est pas opérationnel (poche d'air ou blocage du circulateur), l'installation des tubes va induire une très rapide montée en température du récepteur, qui ne pourra être évacuée.

J'en ai fait une dangereuse expérience en juin 2005, suite à une panne de courant du secteur (fait rare dans mon quartier) : la température est montée à 215 °C, provoquant la fonte de la partie nylon des deux vannes restées ouvertes et des purgeurs automatiques. Avant la destruction de ces accessoires, la soupape de surpression avait bien fonctionné, mais n'avait pas empêché la température de s'accentuer dans le récepteur, bien au contraire. L'échappement de vapeur dans les combles a provoqué, quelques jours plus tard, l'apparition d'auréoles sur les plafonds d'un couloir et d'une salle à manger fraîchement repeints.

Depuis, j'ai trouvé un système autonome et des accessoires résistants pour parer à ce problème (voir p. 98).

Les tubes sont stockés le plus longtemps possible à l'abri de la lumière, puis sont acheminés un par un sur le toit pour être emboîtés dans les logements du récepteur.

Il est vivement recommandé, pour ne pas se brûler, d'éviter de toucher l'extrémité du caloporteur qui dépasse

2 Voir le site www.radiospares.fr.

du tube. En effet, quelques instants à la lumière vive suffisent pour la montée en température !

Programmation de la régulation

Une fois les tubes installés, si le temps est clair, la température va augmenter doucement dans le circuit à partir du récepteur.

Réglages effectués

La régulation déclenche le démarrage du circulateur par une différence de 10 °C entre la température de la sonde à la sortie du capteur et la température de la sonde à la base du ballon. La régulation utilisée est programmée pour cette tâche à 10 °C en usine, mais elle peut être modifiée par l'utilisateur. Ce réglage correspond bien à mes observations et n'a pas fait l'objet de modification.

La sonde de la base du ballon a comme autre rôle d'indiquer la température maximale de sécurité de l'eau du ballon. La programmation en usine pour cette limite était de 60 °C, température à partir de laquelle le circulateur est arrêté en alternance pour limiter l'augmentation de température à la base du ballon. Mais ce procédé n'est plus efficace depuis l'ajout en 2005 d'un deuxième capteur et la modification de la tuyauterie du circuit solaire. J'ai donc depuis modifié la programmation pour augmenter de 20 °C la limite de température dans le ballon.

Autres réglages possibles

Il y a d'autres affichages, notamment les codes de panne par une diode électroluminescente (led) verte ou rouge, allumée ou clignotante, avec indication de codes sur l'écran digital indiquant un circuit ouvert ou fermé, des relais activés ou non, une défaillance de sonde ou d'alimentation électrique.

La régulation comporte plusieurs paramètres non réglables : température affichée au capteur T_C, au préparateur (stockage) T_S, la quantité d'énergie accumulée HA (en kWh), le régime du circulateur électronique de 0 à 100 %, le temps de calibrage (autorégulation de 0 à 5 min).

Les paramètres modifiables par l'utilisateur sont les écarts de température pour le démarrage du circulateur D_T (de 10 à 20 °C), la température d'inversion de zone du préparateur SZ (vanne trois voies pour le sanitaire) de 20 à 80 °C, la température maximale du stockage SX de 20 à 80 °C, la température maximale du capteur CX de 100 à 125 °C, le régime minimal du circulateur PN de 50 à 100 %, la fonction capteur solaire à tubes FT 0 ou 1, le débit maximal du circuit FX 0,0 à 20 l/m et enfin le mode manuel pour l'ensemble des réglages MM. Toutes ces manipulations sont exercées sur trois touches : défilement avant, arrière et sélection/mode de réglages.

Le circulateur

Le kit d'installation des fabricants comprend un circulateur à variation électronique de vitesse, géré par la régulation. Ce circulateur électronique a un prix d'achat très élevé, souvent plus de 300 € hors taxes. J'ai fait le choix d'un circulateur classique en bloquant sur la régulation le régime PN à 100 %. Ce circulateur trouvé en magasin de bricolage, une sous-marque, modèle 13-25 p (trois vitesses de 13 à 48 W), m'a coûté moins de 100 €. Conçu pour une petite installation de chauffage, il convient très bien et n'a pas fait défaut depuis 2004.

Des modifications nécessaires

Premiers constats

Avec un seul capteur et un circuit de tubes rigides de 20/22, j'ai vite constaté un faible rendement, même par beau soleil. L'installation a été établie, en partie, sur les conseils recueillis auprès de professionnels non formés à cette technologie. Elle n'a pas été conçue selon des règles thermiques appropriées. En l'absence totale de documents référents, j'ai eu des instants de doutes sur la qualité de cette installation et le bien-fondé de mon initiative.

Malgré ces erreurs de conception, j'ai fait quelques économies : le peu de calories apportées pour l'aide au chauffage s'est retrouvé sur la consommation de propane, légèrement amoindrie sur l'année. Bien que le circuit 20/22 ait été mal conçu, après l'installation d'un premier capteur solaire, la consommation en 2005 était de 1 950 l de propane, soit une diminution d'environ 8 %.

Augmenter la production de calories

Ajout d'un second capteur

En regardant les photos d'installations présentées sur Internet, je me suis persuadé de l'insuffisance de la surface de mon capteur, et j'ai décidé d'en acheter un second. Le forum de Pierre Amet, en plein essor, m'a permis d'obtenir de précieuses indications techniques de base pour analyser les erreurs et modifier ce qui pouvait l'être. Mais aucun des commentaires et des conseils divulgués n'abordait encore la technologie des tubes sous vide à effet thermos. Les discussions concernaient exclusivement les technologies anciennes (tubes à circulation directe ou tubes à caloduc), présentes sur le marché allemand, différentes du tube à effet thermos par l'installation, le rendement et surtout le coût.

Encore aujourd'hui, beaucoup de « spécialistes » prennent les références de l'un ou l'autre type de capteur à tubes pour donner un avis, souvent négatif, sur les

capteurs à tubes dans leur ensemble – et je constate qu'aucun de ces conseillers ne connaît véritablement l'existence des différences entre les diverses technologies proposées pour ce type de capteurs !

Réduction du diamètre de la tuyauterie

Quelques mois après la mise en service de l'installation, en recherchant un raccord bicône de diamètre 22 pour une petite modification de mon circuit solaire, je discute avec un employé d'une grande surface de bricolage où je prends régulièrement du petit matériel. Cet employé se révèle être un ancien monteur de capteurs sous vide pour une grande marque allemande, et me dit que je suis dans l'erreur en utilisant un si gros diamètre de tuyauterie. Il m'explique que, pour obtenir un rendement suffisant en hiver avec cette petite surface de capteur, il est nécessaire d'utiliser un petit diamètre de tuyauterie : en ralentissant la circulation, cela provoque une perte de charge importante, mais permet une température plus élevée.

Ce circuit restreint présente d'autres avantages : le faible coût du cuivre recuit de 8/10, et son assemblage par raccords mécaniques, sans soudures, coudes ou autres raccords préformés que l'on remplace par le cintrage à la main de ce tube, jusqu'aux différents raccords mécaniques plus petits et donc moins chers.

On peut en outre augmenter l'isolation thermique de ce circuit en enfilant le tube dans une gaine annelée pour protection de tuyauterie sanitaire (qui se déforme peu à la chaleur), avant d'appliquer une mousse de caoutchouc Armaflex.

La modification a nécessité le démontage des tubes sous vide sur le toit et leur stockage dans un grand carton. Le liquide caloporteur est vidangé et récupéré, les isolations sont démontées en essayant d'en récupérer le maximum.

Le couplage d'un deuxième capteur est également mis en œuvre. Il est joint au premier par un double raccord bicône de 22 mm, soit le diamètre du tube, traversant le récepteur au sommet du capteur.

Je réalise ensuite le démontage par sciage des tuyauteries, l'adaptation des raccords filetés en entrée et sortie de capteur, sur les vannes et autres accessoires pour accepter le diamètre 8/10 mm de la tuyauterie, au lieu du 22 mm utilisé initialement.

Afin de modérer les achats de nombreux raccords filetés nécessaires, j'ai dans un premier temps conservé en 22 mm la partie comprenant les accessoires du retour de l'échangeur, anti-siphon, vanne de vidange, mano-soupape, jusqu'au circulateur. Par la suite, les modifications nécessaires ont été apportées pour supprimer la totalité de ce diamètre sur ce circuit.

Le nouveau circuit est assemblé et protégé par la gaine annelée (figure 8.17). J'effectue ensuite le rinçage, l'essai de pression à l'eau claire et la remise en eau avec antigel.

Cintrage des tubes de cuivre

Pour ne pas affaiblir le tube de cuivre recuit, il faut éviter de le cintrer avec les petits accessoires vendus un peu partout dans les magasins de bricolage et respecter impérativement des rayons de cintrage importants. Pris dans une coque de cintrage, le cuivre ne peut que s'étirer sur la surface extérieure du cintrage, en y perdant de son épaisseur.

Il est donc préférable de cintrer le tube de cuivre à la main, en ovalisant légèrement le tube, mais en gardant l'uniformité de son épaisseur.

L'isolation et le remontage des tubes sous vide sont ensuite réalisés.

Après l'installation de mon nouveau circuit, j'ai relevé deux fois la température en sortie de capteur et à la base du ballon : la perte n'excédait pas 0,1 °C sur plus de 6 m.



Figure 8.17
Le tube recuit 8/10 est introduit dans une gaine annelée, ici en blanc, avant de recevoir la mousse Armaflex. Ce procédé permet une isolation maximale.



Figure 8.18
Les réflecteurs CPC qui équipent le deuxième capteur sont très sensibles au vent. De plus, leur rentabilité ne semble pas meilleure que celle des bardeaux d'aluminium bitumineux qui épousent la forme des tuiles sur l'ensemble de la surface du premier capteur.

Essai d'inversion du circuit sur l'échangeur

J'ai aussi essayé une autre modification : l'inversion du circuit sur l'échangeur pour faciliter la remontée du liquide sur la pente naturelle du serpentin et limiter les bulles d'air.

Cela a permis une meilleure évacuation des bulles d'air, mais, après une discussion sur le forum de l'Apper[3], plusieurs personnes ont évoqué des risques de perturbation de la stratification dans le ballon et de remontée de calories massives dans le circuit vers le capteur.

3 http://forum.apper-solaire.org

Cette objection m'étant apparue pertinente, j'ai ré-inversé le circuit sans constater de changement notoire sur les températures. Je pense que le clapet placé sur l'arrivée en bas du ballon a dû modérer la remontée vers le capteur.

Une mise en route à risques

Lors de la mise en route de l'installation modifiée, le 30 avril, la montée en température progresse de manière spectaculaire. Dès 16 h, il y a une alerte ! La programmation limite la température dans le ballon à 60 °C et arrête périodiquement le circulateur. À 17 h, la température atteint 65 °C dans le ballon et 120 °C à la sortie du capteur. Je monte sur la toiture pour bâcher le capteur, avant de reprogrammer la température du ballon à 80 °C, le maximum.

Du 1er mai au 1er juin, la température du ballon varie de 51 °C les jours de pluie à 76,5 °C par beau soleil (la température extérieure sous abri s'élevait alors à 29 °C).

Durant le mois de juin, par beau temps, la limite est souvent atteinte vers 18 h, mettant en surchauffe l'ensemble de l'installation. Pour ne pas mettre en danger le matériel le plus sollicité, j'ai dû plusieurs fois provoquer le démarrage artificiel du circulateur alimentant les radiateurs de la maison, en acceptant provisoirement une détestable élévation de température dans les pièces. Ce défaut serait inexistant avec un volume de stockage plus important, ce qui malheureusement n'est pas possible par manque de place. Une autre solution serait de ne garder qu'un seul capteur, mais la production hivernale serait alors trop faible.

Un essai d'ombrage avec des stores vénitiens

Pour limiter la température et protéger les tubes d'une éventuelle averse de grêle, je décide de fabriquer un ensemble composé d'un cadre en inox surmonté d'un grillage armé tendu. Sous cet ensemble est disposé un store vénitien dont les lamelles sont orientées de manière à être plaquées vers la toiture en cas de forts vents. Le sud-est de Nantes, le secteur élevé sur lequel ma maison est située, est soumis aux vents de l'océan qui s'engouffrent dans la vallée du lac de Grand-Lieu.

La difficulté a été de trouver un moteur de store électrique miniature pour les manœuvres des deux dispositifs de stores jumelés. J'ai parcouru les divers magasins de la région pour me procurer les stores de 2 m de longueur, couleur aluminium brillant, afin de profiter de la réverbération solaire en hiver.

Mon voisin s'est retrouvé à un moment de la journée avec un puissant miroir devant les yeux. Aussi ai-je dû démonter les deux cadres équipés et fonctionnels pour les peindre avec une peinture mate : ce petit incident m'a fait perdre quelques jours. J'ai donc peint plus de 140 lamelles de 1,50 m des deux côtés, après les avoir démontées, puis je les ai réassemblées, et ai réglé l'ensemble.

Le système de store est tiré par trois fins câbles d'inox fixés sur la barre basse du store. Vers le haut du capteur, les câbles sont actionnés par un profilé cylindrique dans lequel est logé le moteur de store. À la base du capteur, une petite poulie tenue par un tendeur reçoit le câble qui rejoint la barre pour la deuxième fixation. Ce système délicat est obligatoire pour la descente du store, trop léger pour la faible pente du toit.

En cas d'élévation de température, une sonde classique, reliée à un thermostat réglé sur 90 °C, actionne le moteur pour tirer le store en position basse. L'ombrage occasionné réduit rapidement la surchauffe et le thermostat fait remonter le store.

Un événement non prévisible a fait avorter ce système difficilement mis au point, mais efficace jusque-là. Mon habitation, qui est située dans le vignoble, voit passer chaque année après les vendanges des millions d'étourneaux. Les rejets de ces turbulents volatiles ont plusieurs fois bloqué le glissement des fines lames de store. Au bout de quelques jours, la plupart ont été pliées et sont devenues totalement irrécupérables. J'ai dû, une fois de plus, démonter les deux ensembles pour les stocker au fond du jardin, et me faire une raison pour les 300 € investis dans les divers matériels expérimentés.

Depuis, pour pallier la surchauffe, j'ai cherché et trouvé une solution autonome.



Figure 8.19
Les stores motorisés automatiques difficilement mis au point ont dû être abandonnés.

Des sécurités contre la surchauffe

Le matériel détérioré par la surchauffe de juin 2005 a été changé : j'ai facilement remplacé les deux vannes manuelles par des vannes en 8/13 en version entièrement métallique. En revanche, il a été plus difficile de trouver, en remplacement des deux purgeurs automatiques, des purgeurs résistant à une température supérieure à 90 °C. Le modèle présenté sur la figure 8.20 convient à des températures de 115 °C. Il semble bien se comporter car les vannes qui les précèdent sont maintenant fermées dès que la purge,

après la mise en route du circuit, est terminée. Ce détail, qui a son importance, n'avait pas été pris en compte lors de la surchauffe qui a détruit ce matériel.



Figure 8.20
Des purgeurs plus résistants.

Autre matériel ajouté, la double soupape différentielle a été conçue pour l'utilisation des foyers de cheminées à production d'eau chaude, afin d'en assurer la sécurité et de limiter la surchauffe !

Le principe est simple (figure 8.21) : la sonde placée au plus près de la source de chaleur, ici la sortie des capteurs, se déclenche à 90 °C en actionnant un double clapet. L'eau en surchauffe est évacuée par l'un des clapets. Une arrivée froide du réseau compense le manque par l'autre. Ces actions entraînent immédiatement le refroidissement du circuit et stoppent la surchauffe, sans perte de pression.

Pour ne pas perturber le circuit, le circuit d'arrivée doit être sous pression et purgé de tout air.

J'ai installé ce dispositif aux points hauts du circuit solaire, soit au faîtage de la toiture, près de la sortie chaude des capteurs. Aucune surchauffe n'a eu lieu depuis.

L'eau chaude évacuée peut être récupérée dans un bidon métallique ou un autre récipient d'une capacité d'une dizaine de litres. Cette évacuation doit toujours être canalisée pour ne pas engendrer de risque de brûlure lors de son échappement.

Le volume évacué à chaque surchauffe est généralement faible, pour mon cas moins d'un litre. Son recyclage est très facile si le glycol contenu dans le circuit est certifié non nocif, EG11 (propylèneglycol). Pour le circuit solaire, ce glycol ne doit pas être mélangé avec de l'eau neutre ou déminéralisée, mais avec de l'eau du réseau potable, chargée au maximum de 100 mg/l de sels minéraux classiques. Les proportions de mélange vont de 25 %, densité 1,023 g/cm³, pour une sécurité antigel à – 10,7 °C, à 55 %, densité 1,049 g/cm³, pour une sécurité antigel de – 40 °C.

Purgeurs manuels
Double soupape
Arrivée capteurs
Retour capteurs
Sonde thermique
Évacuation surchauffe
Apport eau froide

Figure 8.21
Le système prêt à poser.

Bilan et perspectives

Bilan technique

Les relevés consignés assez régulièrement sur un petit carnet depuis 2005 me prouvent que la température engrangée dans le ballon solaire est toujours influente sur l'eau du circuit de chauffage, au retour des radiateurs, pour peu qu'il y ait un minimum de lumière.

Par exemple, le 27 novembre 2005, il y a un temps brumeux toute la journée, la température extérieure est de 0,7 °C. Les températures relevées au capteur et au stockage à différentes heures de la journée sont :

- à 8 h, température de capteur (T_C) de 35,6 °C, et température de stockage (T_S) 29,2 °C ;
- à 15 h, T_C de 44,9 °C et T_S de 34,2 °C ;
- à 20 h, T_C de 10,4 °C et T_S de 33,1 °C.

Ainsi, même par temps couvert, les capteurs chauffent dès 8 h du matin, et durant toute la journée.

Le vendredi 21 mars 2008, par un ciel de giboulées, avec du vent fort et une température moyenne extérieure de 10 °C, les températures relevées sont :

- à 9 h 30, T_C de 15 °C et T_S de 28,3 °C ;
- à 14 h 30, T_C de 52 °C et T_S de 37,7 °C ;
- à 20 h, T_C de 41 °C et T_S 43,7 °C.

Comme le montrent ces chiffres, pratiquement 3 ans après l'installation, le rendement est toujours très intéressant (ce qui semble contredire les Cassandres qui m'annonçaient une baisse de rendement avec le temps). Les températures atteintes

montrent que des capteurs à tubes permettent un bon rendement dans des conditions de température relativement basse et de vent.

Toutefois, sur deux hivers, je déplore un manque important de luminosité qui ne fait pas le bonheur des amateurs de chauffage solaire thermique. Cela confirme le conseil de ne pas essayer d'utiliser seule cette énergie s'il s'agit d'une installation modeste.

Je peux en outre conclure que, sans le principe du chauffage à basse température, rendu possible par le surdimensionnement des radiateurs, l'installation serait inefficace.

Bilan financier

Coûts

Consommations énergétiques antérieures : 2 000 l de gaz propane en moyenne.

Économie d'énergie réalisée : 1 000 l de gaz propane environ après la dernière modification (soit, en 2007, 480 €).

Coût total de l'installation : 3 850 € (après modifications).

Après la modification du circuit en 8/10 et l'installation d'un deuxième capteur, la consommation de gaz propane pour 2006 s'est limitée à 1 036 l, soit 0,547 t (au lieu de 1 950 l en 2005 avec le circuit 20/22 et un seul capteur).

Le coût total du système a été de 3 850 €. À celui de la première installation, qui s'élevait à 2 500 € (ballon solaire, capteur, cuivre), s'est ajouté avec les améliorations ultérieures : 10 m de tube recuit 8/10 + 10 m de gaine sanitaire diamètre 16 + 10 m de mousse Armaflex (65 € l'ensemble), 50 colliers de serrage + 50 rosaces + 50 pattes à vis bois + 50 chevilles plastique (11 € l'ensemble), 10 raccords bicônes (50 €), 12 raccords mécaniques et 5 tés filetés (60 €), 5 vannes + 1 vanne avec purgeur manuel (17 € l'ensemble), 1 capteur 20 tubes sous vide (650 €), 1 double soupape différentielle de décharge avec sonde (150 €), tous les éléments pour réaliser les deux cadres motorisés (abandonnés) pour l'ombrage des tubes (300 €), les bandes adhésives pour recouvrir l'Armaflex (20 € le rouleau de 5 m).

Améliorations

Abandon du glycol

Le peu d'influence du froid sur les capteurs que j'ai pu constater m'a permis d'abandonner l'utilisation du glycol. La température extérieure minimale prévue pour la région sud-nantaise est de – 11 °C. Or, pendant l'hiver 2004/2005, lors d'une nuit où la température a chuté exceptionnellement à – 10 °C, j'ai constaté à 6 h du matin que la température du capteur était de 5 °C.

Sans glycol, il n'y a pas de récupération à prévoir à la sortie de la double soupape différentielle. En contrepartie, afin de ne pas risquer le gel, une isolation parfaite est recommandée sur le circuit soumis aux conditions météorologiques. Pour cette isolation, il faut surveiller en priorité le travail d'exécution de la traversée de toiture, au niveau de la tuile d'aération : elle doit être particulièrement soignée, et agrandie au maximum afin de ne pas blesser la mousse de caoutchouc isolant les tuyauteries.

J'ai constaté la dégradation d'une partie de la mousse d'isolation par des oiseaux. L'idéal pour la partie extérieure du circuit serait de la recouvrir d'une enveloppe métallique, comme le sont les circuits industriels. Dans l'immédiat, je protège cette isolation par des bandes aluminium adhésives en rouleau, destinées au départ à étancher les toitures.

Intégration des capteurs à la toiture

J'ai le projet de découvrir la toiture pour y intégrer les capteurs, ce qui permettra d'obtenir d'une part, la diminution de la prise au vent, et d'autre part, une meilleure esthétique – car le second capteur a été livré avec des profilés d'encadrement légèrement différents du premier (figure 8.22).

D'ici quelque temps, après avoir étudié un système correct, j'effectuerai donc ces travaux en réinstallant les capteurs à plat sur de la volige recouverte d'aluminium bitumineux. La jonction avec les tuiles sera effectuée grâce à de larges bandes de zinc. La fixation des capteurs se fera directement en perçage de la volige et du revêtement aluminium, elle sera étanchéifiée par des pastilles bitumineuses telles qu'on les utilise sur les toitures de fibrociment.

La difficulté est d'assurer une étanchéité à la liaison entre le revêtement bitumineux et les bandes de zinc, ainsi qu'en partie haute entre le récepteur et les tuiles.

L'encadrement sera supprimé. Je ne garderai que le récepteur de tubes et le support du bas avec les colliers de fixation. Pour une esthétique améliorée, je prévois de peindre avec soin ces deux éléments, ainsi que le pourtour en zinc, avec une peinture uréthane brun/noir.

L'intégration en toiture doit aussi permettre un alignement parfait des capteurs, ce que ne permettent pas les larges tuiles en béton. La suppression des tuiles entraînera un abaissement des capteurs de seulement 5 cm environ : les tubes sous vide seront maintenus au-dessus du niveau de toiture, sans subir d'ombre.



Figure 8.22
L'alignement des deux capteurs n'est pas parfait : les deux encadrements sont légèrement différents car le second a été acheté plus d'un an plus tard.



Figure 8.24
Le peu de place disponible ne permet pas un volume de stockage d'énergie suffisant. Il en résulte en été, de nombreuses activités de la soupape de décharge pour éviter les surchauffes !

Pour conclure

L'installation fonctionne, mais elle a été réalisée en partie en autodidacte ; il y a eu beaucoup d'erreurs, de tâtonnements, de modifications qui maintenant n'auraient pas lieu d'être avec l'expérience acquise. Aujourd'hui, avec les connaissances techniques, les conseils, les expériences des adhérents et les offres du groupement d'achats de l'Apper, elle serait réalisée de manière plus efficace.



Figure 8.23
Une esthétique à revoir.

Dans mon installation, le problème majeur est sans aucun doute le volume trop modeste du ballon. Pour les deux capteurs, en été, un minimum de 1 000 l serait plus approprié, mais comme on le voit figure 8.24, il n'y a pas l'emplacement nécessaire dans les 1,50 m² disponibles (le ballon de 300 l n'est passé qu'avec 3 cm de marge par la porte de la chaufferie).

Ce manque de volume m'amène à rechercher une élévation de la température de stockage (autrement l'énergie stockée est insuffisante) à plus de 80 °C, ce qui constitue un danger. À cette température, le système est proche de la saturation, de l'arrêt du circulateur et de la surchauffe dans les récepteurs des tubes, ce qui risque d'entraîner la détérioration de l'ensemble des éléments dans ce secteur. À ce stade, la sécurité repose sur la seule soupape différentielle de décharge, chargée d'évacuer l'eau en surchauffe et d'apporter de l'eau froide dans le circuit à l'entrée des capteurs. Théoriquement, cet élément thermodynamique est fiable et ne semble pas être sujet à un dysfonctionnement. Mais à plus de 80 °C, situation fréquente en été, elle peut constituer le maillon faible de la sécurité de l'ensemble.

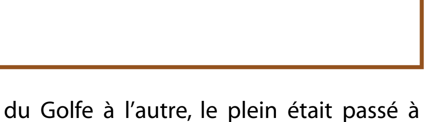
Avec le recul, je me rends compte que, pour un tel projet, l'idéal est d'étudier au préalable certains paramètres essentiels : l'isolation de la maison, son exposition solaire, les appoints solaires possibles pour les besoins en énergie, les possibilités de volume de stockage, et surtout la dimension de la surface des capteurs pour éviter au maximum la surchauffe. Je n'avais pas imaginé l'importance de ces éléments en me lançant dans ma réalisation, mais ils permettent d'optimiser de façon très importante son installation.

Réalisation n° 4

par Yves Guern

- 18 m² de capteurs plans
- Ballon tampon de 1 500 l pour chauffage par radiateurs
- Eau chaude sanitaire séparée de 600 l
- Capteurs autovidangeables (drainback)
- Régulation par un automate programmable industriel







La maison, située en Provence, est correctement isolée, du moins pour la partie que j'ai agrandie (65 % de la surface) ; elle est d'une superficie habitable de 140 m², 5 personnes y demeurent. Le village où elle se trouve a la réputation d'avoir de grandes amplitudes thermiques entre le jour et la nuit : l'hiver, s'il est courant d'avoir des nuits à – 15 °C, il est relativement rare que la température soit négative à 13 h. C'est en Provence – mais le chauffage est indispensable !

La maison était initialement chauffée à l'électricité. Je suis passé au fioul il y a huit ans pour réduire la facture et améliorer le confort. Il s'agissait d'une installation classique de chauffage central à radiateurs avec eau chaude sanitaire intégrée à la chaudière. Le premier plein de la cuve m'avait coûté 450 €. Fin 2005, d'une crise du Golfe à l'autre, le plein était passé à 1 050 €[1]. Il était urgent d'agir.

Je savais que l'utilisation de l'énergie solaire était très développée en Allemagne. Si cela marche là-bas, pourquoi ne pas le faire en Provence, où l'ensoleillement est très fort ? J'ai demandé des devis, mais aucun ne proposait de solution « raisonnable » ; quand je leur parlais de solaire, les plombiers me répondaient pompes à chaleur (air-air en général) ! J'ai alors découvert le site de Pierre Amet, qui m'a permis de débuter dans le solaire.

Ce qui suit s'apparente à un carnet de bord, le texte a été écrit au fur et à mesure de la conception et de l'installation. Il contient forcément des erreurs ; certaines ont été vues en cours d'utilisation, et sont signalées.

1 Début 2008, il approche les 1 400 € !

Quelques mots sur l'autoconstructeur

Âge : 46 ans.

Formation : ingénieur (physicien).

Profession : travaille dans une société développant des instruments de mesures à base d'optique et d'informatique.

Intérêts particuliers : le VTT et le bricolage (niveau « averti »). En matière de bricolage, apprécie particulièrement le bois (menuiserie, charpente). Lors de l'agrandissement de sa maison, s'est occupé de tous les corps de métier à l'exception de la plomberie.

Domaine de réticence au départ : la plomberie.



Figure 9.1
Les panneaux solaires sur la pergola.



Figure 9.2
Les panneaux solaires, vus du toit.

Choix de l'installation

Après de nombreuses recherches et de multiples calculs, j'ai adopté, pour l'eau chaude sanitaire, la règle de 1 m² de capteurs par personne, et j'y ai ajouté, pour le chauffage solaire, 10 % de la surface habitable (pourcentage trouvé dans la documentation Dietrisol[2] notamment). J'obtiens un total de 20 m², ce qui correspond à la tranche haute des autres calculs faits.

À l'époque, il me semblait que deux capteurs supplémentaires influaient peu sur le coût global du chantier – l'expérience m'incite à modérer cet avis car, pour passer de 6 à 8 panneaux, il faut, par exemple, une pompe 70 % plus puissante pour lutter contre les pertes de charge liées à l'augmentation du débit. J'étais prêt à masquer éventuellement en été, mais cela n'a pas été nécessaire jusqu'à présent.

Évaluation des besoins à partir de la consommation de fioul

En été, pour l'eau chaude sanitaire seule, mon installation consommait 3 l par jour de fioul, soit 30 kWh par jour. C'est beaucoup. Je me suis rendu compte que mon type de chaudière fait que le rendement n'est que de 50 % pour l'eau chaude sanitaire. Cela ramène donc le besoin vrai à 15 kWh, ce qui est plus raisonnable (15 kWh correspondent à 300 l chauffés à une température de 40 °C).

En hiver, 13 l par jour (en moyenne sur cinq mois) étaient nécessaires, dont 4 l environ pour l'eau chaude sanitaire. Il faut donc 90 kWh pour le chauffage soit 0,7 kWh par mètre carré habité.

Pour 20 m² de capteurs, nous obtenons environ, par jour, compte tenu des ombres portées, 60 kWh disponibles en décembre, 100 kWh en février, 130 à 140 kWh en été (ces kilowattheures sont ceux disponibles au niveau des capteurs, hors rendement de l'installation).

L'économie visée est de 100 % de l'eau chaude sanitaire en été et de 50 % (de manière optimiste) de la consommation hivernale totale, soit 1 600 l de fioul. La dernière livraison de fioul (en février 2006) s'élevait à 1 050 € pour 1 500 l.

Hors économies liées à l'alimentation des lave-linge et lave-vaisselle, on peut donc penser économiser 1 000 €/an.

Coût de fonctionnement d'un circulateur

Le coût de fonctionnement de ce type de matériel est faible : pour 100 W, nous avons 0,1 kW × 7 h × 350 j × 0,1 € = 245 kWh × 0,1 € = 24,5 € par an.

Dimensionnement de l'installation

Les capteurs sont placés sur un auvent qui sert d'abri de voiture, sur deux rangées de 8 m de long, à proximité immédiate de la chaufferie – cet élément est loin d'être négligeable dans les pertes de charge. Ils sont orientés face au sud et inclinés à 60°, de façon à augmenter l'efficacité l'hiver et à limiter la surchauffe en été.

J'ai été séduit par le système de vidange automatique des capteurs (drainback) pour toutes les raisons expliquées en détail p. 36.

2 http://www.dedietrich-thermique.fr

Pour le stock, il faut compter 40 à 80 l/m^2 de capteurs, soit 800 à 1 600 l dans mon installation.

Il existe des systèmes industriels intégrés très bien faits (Rotex par exemple), mais ils sont composés d'un stock important d'eau morte et de nombreux échangeurs : cela m'a paru trop compliqué. La chaudière actuelle, qui n'est pas totalement adaptée à cette évolution, est à mi-vie ; j'ai donc décidé de séparer les tampons eau chaude sanitaire et chauffage solaire, pour plus de liberté dans le futur. Cette séparation s'est révélée relativement complexe à mettre au point et j'ai douté jusqu'à la fin du chantier. Le premier hiver est passé, et je peux confirmer que c'est une bonne idée.



Figure 9.3
Les stocks de calories.
ⓐ *Eau chaude sanitaire 600 l 2 serpentins.*
ⓑ *Stock chauffage 1 500 l.*

Pour le chauffage solaire, il s'agit d'un tampon drainback de 1 500 l (voir figure 9.3). Pour l'eau chaude sanitaire, c'est un ballon de 600 l environ, classique (sous pression), avec deux serpentins (je n'en utilise qu'un pour l'instant). J'avais initialement pensé prendre 300 l, mais Pierre Amet m'a conseillé davantage pour avoir de l'autonomie par mauvais temps. Je suis très content d'avoir suivi ce conseil. C'est un surdimensionnement qui ne coûte pas cher, encombrant certes, mais qui offre effectivement beaucoup d'autonomie.

Technologie du système autovidangeable (drainback)

Drainback est le mot anglais pour système autovidangeable. Dans ce type d'installation, les panneaux se vident lorsqu'il n'y a pas de calorie à espérer ou lorsque l'on dépasse 100 °C. Il en existe deux types légèrement différents : le type « Rotex », qui ne comporte pas d'échangeur dans le cicuit des panneaux, et le type « classique », qui en comporte un (voir ci-dessous). Mon installation utilise finalement les deux (ce que je n'avais pas prévu au départ).

Drainback sans échangeur

Un système type Rotex se compose d'une cuve, de panneaux situés plus haut que la surface libre de la cuve ($h_{min} > 0$), et d'une pompe (ou deux) située en dessous de la surface libre, le plus bas possible pour l'amorcer et éviter la cavitation[3]. Ce problème de cavitation, qui détruit les pompes, n'apparaît pas dans les systèmes solaires « normaux » car la pompe est dans un circuit sous pression.

Quatre états caractérisent le fonctionnement de ce type de drainback (figure 9.4).

- À l'arrêt les panneaux sont vides, le tuyau de départ (vers les panneaux) est plein jusqu'à la surface libre, celui de retour est vide (figure 9.4-1).
- Lorsque la pompe se met en route (parce que le bas du stock est plus froid que le panneau où se situe la sonde), l'eau monte et remplit petit à petit les panneaux. L'air est expulsé par l'évent situé sur le tuyau retour. À ce moment, la pompe doit vaincre une hauteur manométrique égale à au moins h_{max}. À ce stade, elle n'a théoriquement pas besoin de le faire avec un gros débit (figure 9.4-2).

  L'eau a rempli les panneaux et s'écoule donc dans le tuyau de retour. Au moment où l'eau atteint la surface libre, on a presque amorcé un siphon : la pompe n'a plus à vaincre que la perte de charge liée au débit, mais plus h_{max}. Lorsque h_{max} est important, on met deux pompes en série. La deuxième, située au-dessus de la première, n'est active que lors du remplissage pour vaincre h_{max}.

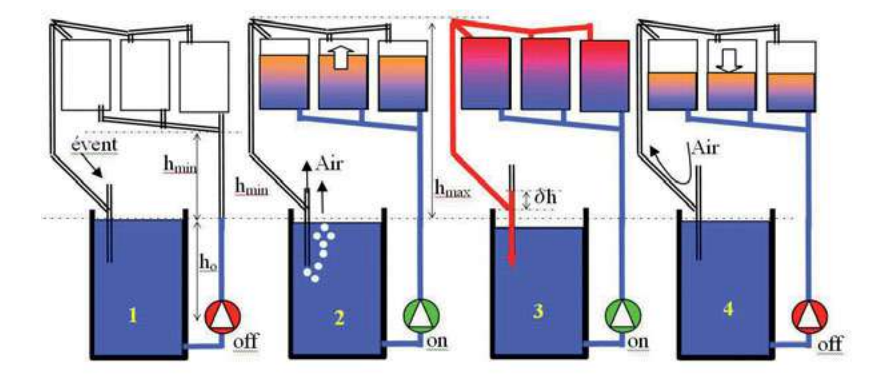


Figure 9.4
Cycle de remplissage-vidange d'un système autovidangeable sans échangeur.

3 Formation de bulles d'air dans un liquide en dépression.

Lors de cette phase de remplissage, le tuyau de retour contient de l'eau et de l'air. Si la vitesse de l'eau est suffisante, les bulles d'air sont poussées vers la cuve. Le niveau d'eau dans l'évent est à ce moment très variable : il dépend de la perte de charge en aval. Pour mon installation, l'eau monte à plus de 1 m.

- Une fois le système amorcé complètement (1 min environ), cette hauteur devient quasiment nulle. La hauteur d'eau dans le stock a diminué du volume nécessaire à remplir le circuit (figure 9.4-3).
- Lorsque la pompe s'arrête, l'eau a tendance à vouloir redescendre sous son propre poids. L'air est aspiré par l'évent et remonte dans le tuyau de retour. Les panneaux se vident par le tuyau de départ, au travers de la pompe : le compteur tourne à l'envers (figure 9.4-4).

Drainback classique avec échangeur

Pour pouvoir utiliser un circuit classique (à serpentin), le problème est de trouver de l'eau pour remplir les panneaux. On rencontre deux montages classiques : l'un avec une réserve tampon en série (figure 9.5-1), l'autre en parallèle (figure 9.5-2). Dans les deux cas, le tampon doit être surdimensionné par rapport au volume à remplir.

La solution en série a probablement l'inconvénient d'être bruyante et de remélanger en permanence air et eau. La solution en parallèle est silencieuse, la réserve peut être installée en aval du serpentin (figure 9.5) ou en amont (comme dans mon montage, figure 9.8). Cette méthode évite également d'envoyer dans les panneaux de l'eau à la température du tampon, température généralement sans grand rapport avec celle du serpentin (ce qui provoque des instabilités de la régulation au démarrage de la pompe).

La solution « en parallèle » requiert, côté eau chaude, un système permettant à l'air chassé lors de la phase d'amorçage d'être évacué par l'évent. On évite ainsi qu'il soit entraîné par l'eau, et donc circule dans le serpentin puis la pompe.

Certains systèmes drainback utilisent l'eau de ville comme réserve. Il n'y a pas de stock intermédiaire, le circuit est mis en communication avec le réseau d'eau pour remplir les panneaux, puis l'eau est jetée à l'égout lors de la vidange. Cela n'est pas écologique a priori, mais en général ces capteurs fonctionnent sur une logique légèrement différente : au lieu de se vider à chaque arrêt de la pompe, ils ne se vident qu'en cas d'urgence (trop chaud ou trop froid). Cependant, en hiver, ils se vident au moins une fois par jour pour assurer la protection contre le gel (voir *Principaux avantages*, ci-après).

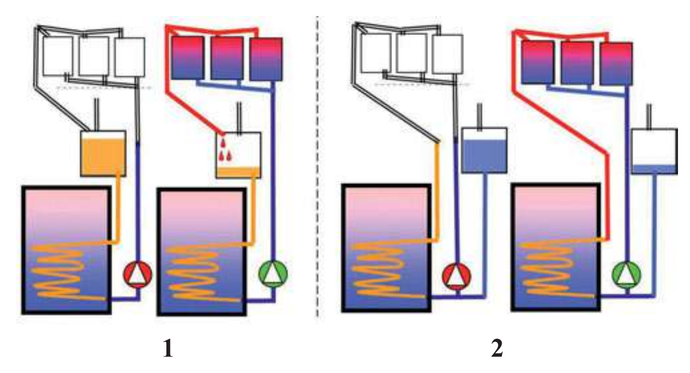


Figure 9.5
Fonctionnement d'un système autovidangeable avec réserve série (1) ou parallèle (2).

Principaux avantages

Le système présenté ici n'est pas que du bricolage : Rotex (Allemagne) propose une version industrialisée de ce concept pour des systèmes individuels. C'est également une solution très répandue aux États-Unis, même pour des systèmes de chauffages collectifs.

- Il fonctionne sans antigel (du moins à première vue). C'est moins cher, plus efficace au niveau des échanges thermiques et le liquide ne subit pas de vieillissement.
- Il ne nécessite pas de purge, pas de vase d'expansion, etc.
- La durée de vie et la faible maintenance sont assurées par principe. Il n'y a que la pompe qui puisse avoir des problèmes. Il faut faire attention à la cavitation.
- Le drainback semble plus simple en autoconstruction car ce n'est pas un système sous pression, ce qui fait moins peur. Mais cela ne change pas grand-chose car toute fuite, même minime, doit être réparée faute de quoi l'amorçage du système devient problématique.
- On peut chauffer davantage le tampon en été (quasiment à ébullition).
- C'est une réserve à eau morte, il n'y a donc pas de problème d'entartrage. Cependant, elle n'est pas complètement morte car il y a un apport en oxygène à chaque remplissage et, dans le cas du montage classique avec tampon en série, cet apport est permanent.
- Il n'y a pas d'échangeur dans le circuit des capteurs dans les systèmes type

Rotex, ce qui est plus efficace pour apporter des calories. Mais il en faut un pour extraire ces calories du stock et les utiliser.

Prétendus inconvénients

Il faut savoir tout d'abord que ce type d'installation n'a rien de compliqué. En parcourant la littérature et en suivant différentes conversations, j'avais entendu dire que le système Rotex était bruyant et que les panneaux subissaient un choc thermique au moment du remplissage. Voici mon constat.

Bruit

En dehors des cinq premières minutes où l'on entend des bulles (bruit très supportable), le système est très silencieux. En fait, il n'y a pas de raison qu'il y circule des bulles (et d'ailleurs ce n'est vraiment pas bon signe). Finalement, le plus bruyant n'est même pas la pompe (posée sur des silentblocs bricolés) mais le compteur qui sert de débitmètre.

Chocs thermiques

Depuis que l'installation fonctionne correctement, je n'ai plus de problème de chocs thermiques. La circulation se déclenche lorsque l'écart de température entre les capteurs et le bas du stock atteint 10 °C. Au maximum, lorsque les capteurs sont à 95 °C (et le bas de stock à 85 °C), l'eau ne bout pas, il n'y a pas de formation de vapeur, pas de coup de bélier. De toute façon, les systèmes drainback ne peuvent pas monter très haut en pression car l'évent fuit avant que cela n'arrive.

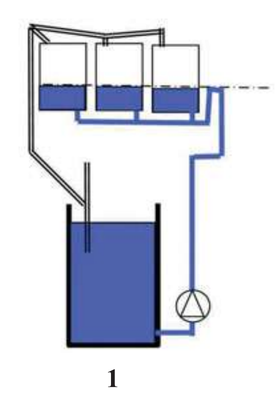
- L'eau injectée dans le capteur n'étant que 10 °C plus froide que le capteur, le choc thermique est limité. Le cuivre a un coefficient de dilatation de $1{,}7 \times 10^{-5}$. Sur la longueur d'un panneau (de 2 m), cela fait $2\,000 \times 15 \times 1{,}7 \times 10^{-5}$ = 0,5 mm, ce qui me semble raisonnablement inclus dans le jeu possible des panneaux.
- D'autre part, la régulation du système Rotex le prévoit : lorsque les capteurs sont trop chauds, la pompe ne s'amorce pas et/ou s'arrête. Il n'y a donc pas d'ébullition possible. La notice Rotex prévoit également de pouvoir débrayer cette fonction, ce que j'ai fait.

L'expérience acquise en été conduit à modifier le calcul ci-dessus. Lorsque le ballon d'eau chaude sanitaire est plein (à 82 °C), on ne le chauffe plus et on utilise alors l'eau du stock pour limiter les surchauffes des capteurs. Lorsque les capteurs dépassent 93 °C, on remet la pompe en route. Dans ce cas, l'eau injectée est autour de 35 °C, soit un écart de 60 °C, la dilatation est alors de 2 mm, ce qui reste raisonnable mais c'est un argument supplémentaire pour utiliser des raccords hydrauliques capteurs-collecteurs flexibles. Je le rappelle encore, la génération éventuelle de vapeur ne peut créer de surpression (grâce à l'évent), et le remplissage toujours silencieux des panneaux indique l'absence de stress mécanique.

Précautions pour l'installation

L'installation est simple à réaliser si on ne cherche pas à avoir deux stocks. Les précautions ci-dessous, sauf peut-être la dernière, sont celles qui sont pratiquées le plus souvent. On peut vérifier leur utilité dans un évier.

Il ne faut absolument pas de siphon sur la conduite de départ (eau froide). Sinon les capteurs ne se vident pas, au mieux ils se vident jusqu'à la hauteur du siphon (figure 9.6-1). Il faut donc une pente constante tout au long de ce(s)



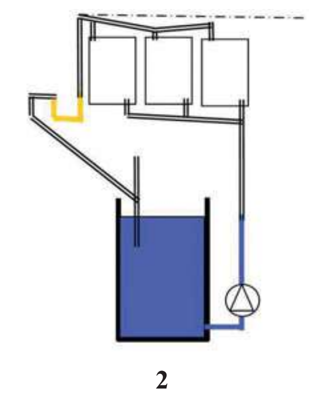


Figure 9.6
Siphons dans les collecteurs.

Valeurs types de pression minimale à l'aspiration à respecter

Températures	50 °C	82 °C	95 °C	110 °C
Pompe Salmson NXL	-	1,5 m	3 m	10 m
Pompe WILO TOP S	0,5 m	-	5 m	11 m

tuyau(x). Sur un montage en Tickelman avec 2 × 4 panneaux, cela nécessite de partir d'assez bas pour obtenir la pente sur toute la longueur.

Pour la ligne retour, c'est moins grave : un siphon n'empêchera pas les panneaux de se vider, cela va simplement être plus long (puisque c'est par là que l'air passe). Mais le siphon restera plus ou moins plein, ce qui peut être un grave inconvénient en cas de gel (figure 9.6-2).

En haut des panneaux, le collecteur n'est pas obligatoirement rectiligne, il peut se vider dans un capteur ou l'autre (figure 9.6). Mais il ne faut pas exagérer : le risque est de créer une poche d'air au remplissage, ce risque étant d'autant plus important que h_{max} est grand car, en fin de remplissage des panneaux, le débit est faible et l'air peut éventuellement ne pas être chassé par l'eau. Il me semble qu'il faut que le point le plus haut soit après le dernier panneau (dans le sens du courant) : si une poche d'air se forme, autant que ce soit là où le débit est le plus grand.

Il faut mettre la pompe la plus basse possible pour respecter la « pression minimale à l'aspiration ». Dans le tableau ci-dessous, vous trouverez quelques valeurs typiques (en mètres d'eau) à respecter pour la « pression minimale à l'aspiration » en fonction de la température de l'eau.

La pression minimale est la pression en dessous de laquelle il y aura formation de bulles d'air dans la pompe (cavitation). Ces bulles nuisent évidemment à l'efficacité de pompage, mais aussi à son refroidissement (jusqu'à la détruire…). Comme vous pouvez le voir sur le tableau, un tampon de 2 m de hauteur est tout juste suffisant. Tous les ballons d'eau chaude sanitaire ont la dernière spire de l'échangeur plus basse que la sortie : cela forme un piège à bulles difficiles à purger. Plus la pompe est basse, mieux ces bulles sont évacuées.

Attention

Le désamorçage est à peu près la seule cause de défaillance d'un circulateur. Un chauffagiste m'a dit qu'il n'avait jamais remplacé une pompe « morte spontanément ».

Enfin, il faut s'assurer d'avoir une pente suffisante dans tous les panneaux. Dans mon installation où les panneaux sont couchés horizontalement, la pente des tubes n'est pas forcément égale à celle du bâti. Ceci est lié au jeu qui existe entre le bâti et le circuit collecteur. Avec une pente insuffisante, un des panneaux a gelé. Maintenant j'ai forcé le jeu dans le bon sens sur tous les panneaux (figure 9.7).

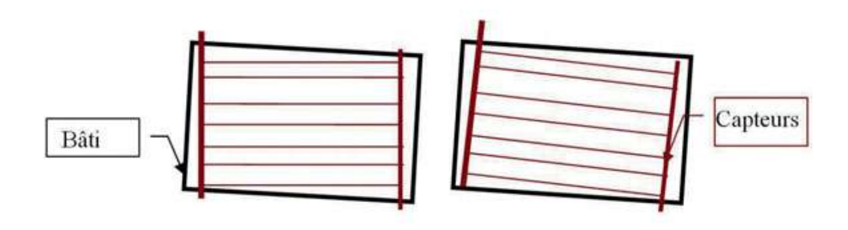


Figure 9.7
Écarts entre la pente du bâti et la pente réelle. Figure de gauche : jeu annulant la pente. Figure de droite : jeu doublant la pente.

Principe de l'installation

Récupération des calories

On le voit sur la partie gauche de la figure 9.8 : les calories sont récupérées par un stock d'eau morte de 1 500 l (pour le chauffage) et un ballon d'eau chaude sanitaire de 600 l. Lorsque le circulateur C1 fonctionne, il envoie l'eau vers les panneaux. Selon la position de V3PS, l'eau provient soit du stock d'eau morte soit du ballon.

Les deux stocks sont équipés de capteurs de température en bas de cuve (T_{Sb} et T_{Bb}). Lorsque l'une de ces températures est plus faible que la température des capteurs (T_c), le circulateur C1 se met en marche.

Utilisation du chauffage

Un circulateur (C4) s'enclenche lorsque la température à l'intérieur de la maison est trop froide (matériel préexistant).

Lorsque l'eau qui revient des radiateurs (mesurée par T_R) est plus froide que le haut du stock (T_{Sh}), V3CH oriente l'eau vers l'échangeur du stock, elle revient ensuite préchauffée vers la chaudière. Si le stock est très chaud, l'eau retourne directement aux radiateurs (la chaudière est court-circuitée), sinon l'eau rentre dans la chaudière (elle est donc en série) pour un réchauffage final. VTH2 est une vanne thermostatique (réglée à environ 50 °C) qui assure cet aiguillage.

V3R est une vanne à secteur (existante) qui permet d'ajuster la température des radiateurs. Elle mélange plus ou moins l'eau qui revient des radiateurs avec de l'eau qui provient de la chaudière. Je l'ai automatisée en fonction de la température extérieure (T_{Ext}).

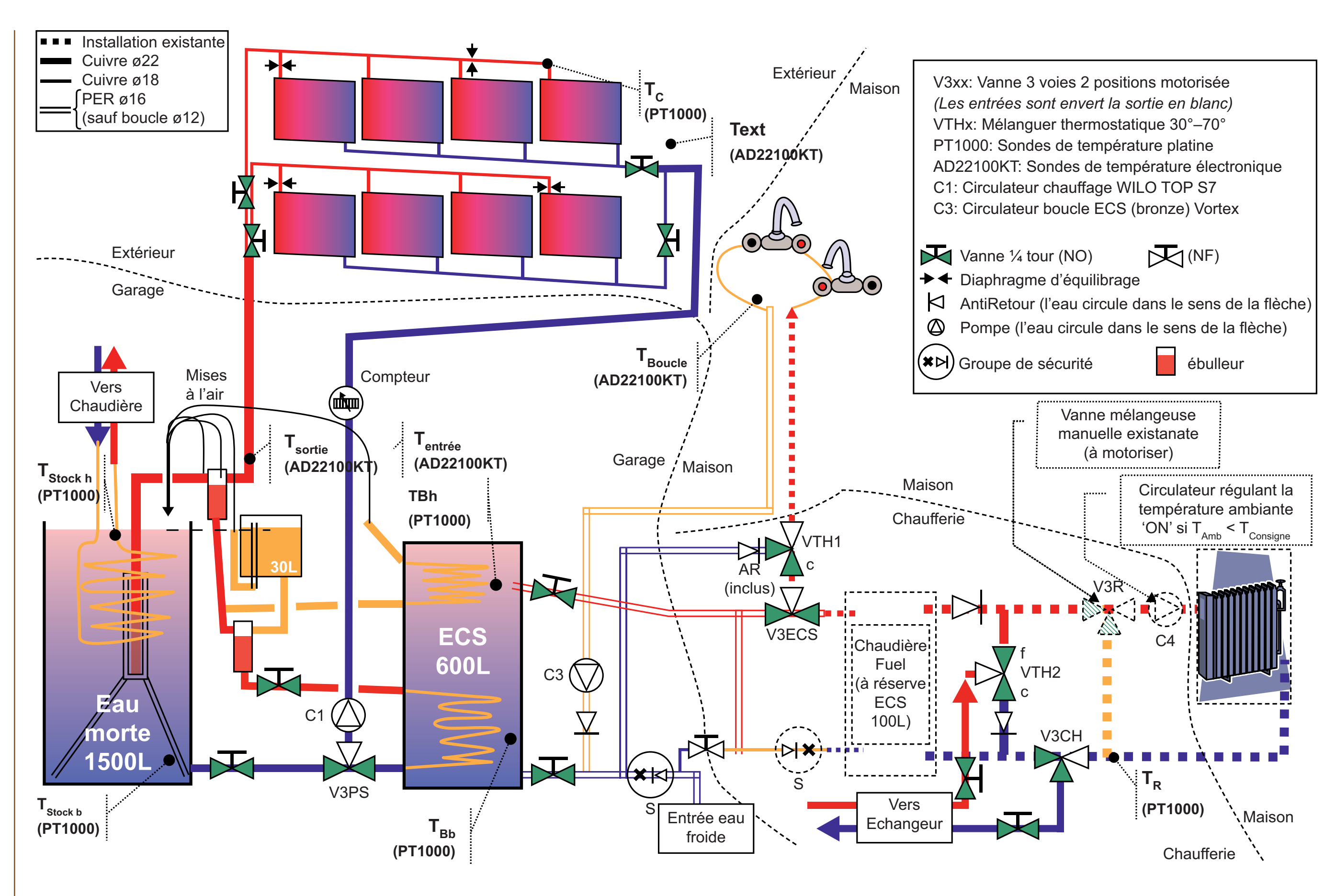


Figure 9.8
Schéma de l'installation.

Lors de la conception du schéma (et dans la réalisation des automatismes décrits ci-dessous), j'ai gardé la possibilité de revenir à la solution chauffage au fioul de façon simple. C'est une précaution a priori inutile car le système solaire est supposé plus fiable que la chaudière, mais on ne sait jamais.

Utilisation de l'eau chaude sanitaire

Lorsque la température haute (T_{Bh}) du ballon d'eau chaude sanitaire est suffisante, V3ECS est orientée vers le stock, l'eau chaude est donc 100 % solaire. Lorsque la température est insuffisante, V3ECS est orientée vers la chaudière. Lors d'un appel d'eau chaude, l'eau qui pénètre dans la chaudière provient du ballon d'eau chaude sanitaire et est donc préchauffée. Ici aussi, la chaudière est placée en série.

J'ai ajouté un robinet thermostatique VTH1. Il n'a rien d'obligatoire, mais assure trois fonctions. La première est de limiter la température de l'eau dans le tuyau d'eau chaude pour éviter le risque de s'ébouillanter en été. La seconde est que cette limitation de température réduit les pertes de calories dans les tuyaux. J'ai découvert la troisième à l'utilisation : au bout d'une semaine, on ne perd plus de temps à régler la température de l'eau chaude au robinet puisqu'elle entre dans les mitigeurs toujours à la même température. On économise donc de l'eau.

Le circulateur eau chaude sanitaire (C3) n'a rien d'obligatoire également. Suite aux séries de travaux dans la maison, les points de puisage d'eau chaude se sont éloignés de la source petit à petit, et l'eau chaude était très longue à arriver

au robinet. Cette pompe est donc activée le matin, le midi et le soir si la température du tuyau d'eau chaude (T_{Boucle}) est inférieure à 80 % de la température haute du ballon d'eau chaude sanitaire (T_{Bh}). L'eau pompée est renvoyée en bas du ballon d'eau chaude sanitaire. En dehors du confort, cette pompe à l'intérêt écologique d'économiser l'eau : on ne passe pas plusieurs minutes à faire couler de l'eau en attendant qu'elle soit chaude.

La régulation

Le principe de fonctionnement de la régulation se résume de la manière suivante.

En hiver, le tampon dont la température (mesurée en bas) est la plus froide est chauffé. Lorsque le bas de l'eau chaude sanitaire atteint 20 °C, on ne chauffe plus que le stock chauffage.

En été, l'eau chaude sanitaire est chauffée jusqu'à 75 °C. Le stock de chauffage n'est chauffé que pour lutter contre la surchauffe des capteurs. Je ne suis pas sûr que cette dernière fonction soit utile en drainback, mais je n'ai pas trouvé d'information à ce sujet.

Les différents modes de fonctionnement sont illustrés ici par trois schémas simplifiés.

▶ Situation en été, le soir (figure 9.9)

La chaudière est éteinte, l'eau chaude sanitaire est suffisamment chaude pour que le circulateur C3 soit actif. Le stock de chauffage est froid : il n'est pas prioritaire en été. Les panneaux sont vides puisqu'il fait nuit.

▶ Première situation en hiver, la journée (figure 9.10)

Il fait suffisamment chaud pour que le circulateur C1 soit en marche : les panneaux sont pleins. On chauffe le stock. La maison

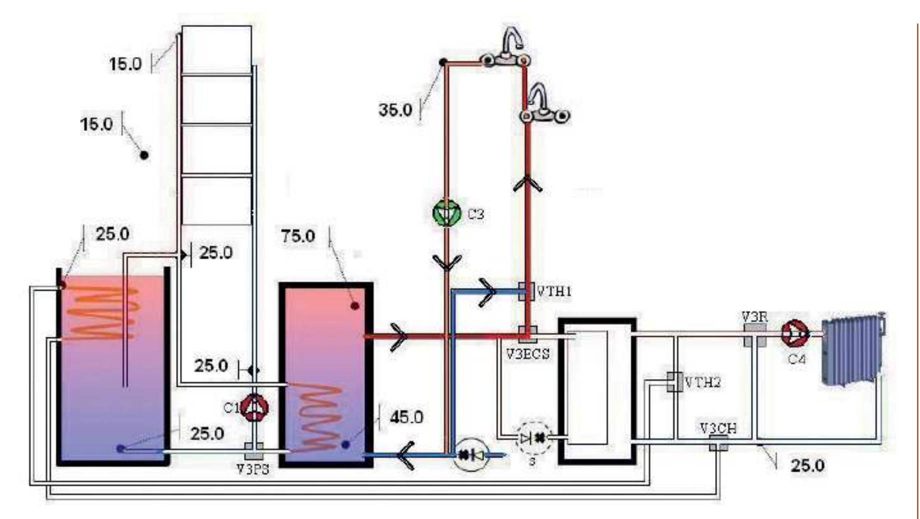


Figure 9.9

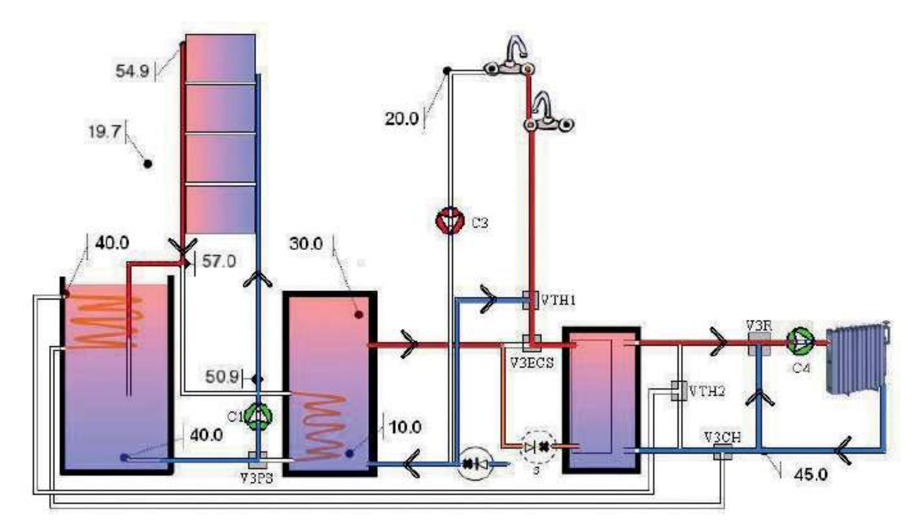


Figure 9.10

est froide, C4 est en marche également. La température de retour des radiateurs est supérieure (45 °C) à celle du stock (40 °C) : V3CH oriente le débit directement dans la chaudière.

Le stock d'eau chaude sanitaire n'est pas suffisamment chaud : C3 est inactive et V3ECS puise l'eau chaude sanitaire dans la chaudière. L'entrée d'eau froide (qui est tiède) de la chaudière provient du ballon d'eau chaude sanitaire. La chaudière ne doit donc plus fournir que 15 °C au lieu de 35 °C.

▶ Deuxième situation en hiver, la journée (figure 9.11)

Le stock de chauffage est chaud et V3PS est orienté pour réchauffer l'eau chaude sanitaire, les panneaux sont pleins. La maison est froide, C4 est en marche. La

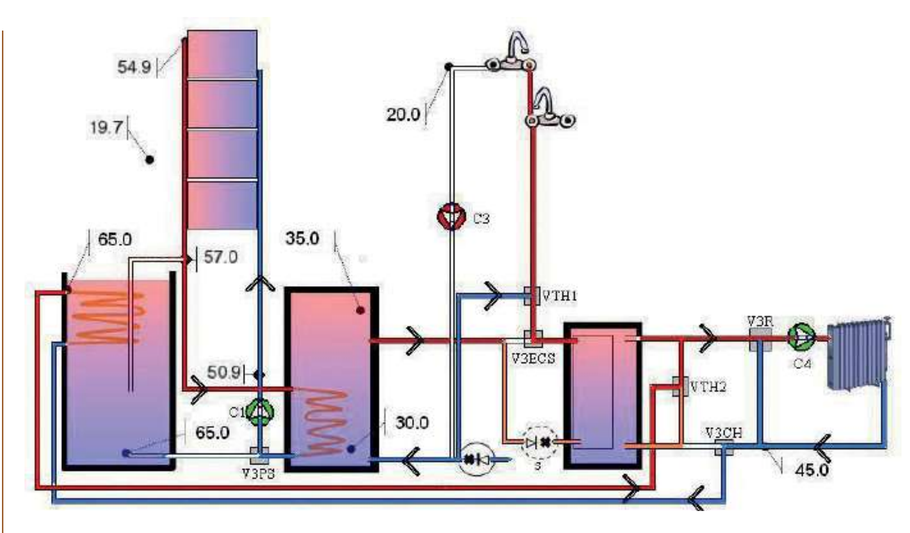


Figure 9.11

température de retour des radiateurs est inférieure (45 °C) à celle du stock (65 °C) : V3CH oriente le débit vers l'échangeur du stock d'où elle ressort préchauffée à 65 °C pour aller vers la chaudière. À 65 °C, VTH2 oriente prioritairement cette eau directement vers les radiateurs.

Choix des composants

Diamètre des tuyaux

La contrainte à respecter est la suivante : il faut pouvoir chasser les bulles d'air dans le tuyau à contre-pente (pour l'eau chaude).

Quelques notions de mécanique des fluides[4] permettent un calcul rapide. La vitesse d'une bulle d'air est inférieure à 40 cm/s, ce qui fixe un débit minimal lors de la purge. Dans les capteurs, le débit nécessaire est de 40 à 80 l/h/m^2, soit, pour 20 m^2, 800 à 1 600 l/h (ce qui correspond à environ 10 à 25 l/min). La section maximale du tuyau de descente (la contre-pente) est donc de 10 / (60 × 4) = 0,041 dm^2, soit un diamètre intérieur maximal de 23 mm. Ainsi, le dégazage ne doit pas être un problème si le diamètre intérieur du tuyau chaud est inférieur à 18 mm (ce qui laisse même une grande marge de sécurité).

Circulateur

Perte de pression

Les pertes de pression sont grossièrement de 10 mm/m de collecteur (source Solo).

La longueur aller en eau froide est de 21 m, et celle du retour en eau chaude est de 20 m, soit un maximum d'environ 45 m, ce qui représente 450 mm de perte de charge. La perte dans les capteurs (en parallèle) s'élève à 10 mbar, ce qui est négligeable. Un calcul de mécanique des fluides pour 1 m^3/h dans des tuyaux de 18 mm de diamètre et sur une longueur de 45 m donne 500 mm de perte (sur Internet, j'ai trouvé 1 300 mm en 14 mm de diamètre).

Deux circulateurs pour l'amorçage ?

J'ai fait quelques essais avec des pompes Salmson NXL33 et un seul groupe de quatre panneaux. Une pompe placée à 50 cm du sol (soit 1,5 m en dessous de la surface libre du tampon) n'arrive pas à amorcer le circuit en basse vitesse, par contre y arrive en moins de 2 min à haute vitesse. Après amorçage, on obtient un débit de 360 l/h en petite vitesse sur quatre panneaux. L'amorçage est plus efficace (il n'y a plus de bulles) et plus rapide (60 s) avec deux pompes en série à haute vitesse. J'étais inquiet car j'avais plein de bulles, j'ai donc acheté la deuxième pompe mais le problème ne venait pas de là.

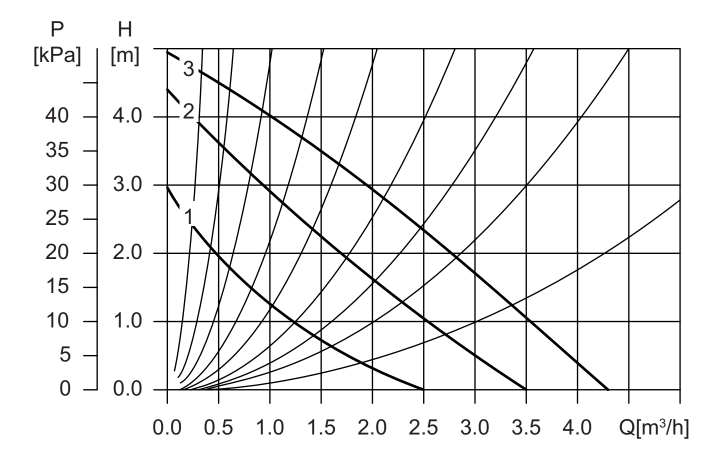


Figure 9.12
Pression P et hauteur H en fonction du débit Q (source : Wilo).

4 Voir également : http://www.pmmh.espci.fr/fr/Enseignement/Archives/Examens/2000/exam2000.pdf

Quand j'ai mis les deux groupes de panneaux, que les pompes soient en parallèle ou en série, aucune des deux solutions n'était capable d'assurer le débit. J'ai donc recherché dans les livres afin de comprendre ce que représentent les courbes d'efficacité des pompes. Sur le forum Apper, une personne disait : « Série ou parallèle, c'est une hérésie, il faut une seule pompe de la bonne dimension. »

- Des pompes en parallèle semblent pouvoir fournir plus de débit (mais sans augmenter la hauteur maximale). Comme le débit possible est plus fort, les pertes le sont aussi et dans une proportion au carré. Finalement le débit est inchangé car la limite est la hauteur manométrique.
- En série, la deuxième pompe représente une perte de charge pour la première. Elle doit donc être activée au moins en vitesse lente pour compenser. Dans ce cas, il est vrai que la hauteur manométrique est augmentée (somme des deux hauteurs), mais le débit final reste proche du débit avec une seule pompe.

Dans le diagramme de la figure 9.12, les trois courbes de pente négative représentent l'équation de la pompe en fonction des trois vitesses de rotation. Sommairement, elles sont de la forme $P_{lim} = P_0 - A \times Q$. À débit nul, la pompe peut vaincre une pression égale à P_0 (5 m en vitesse 3 dans la courbe de la figure 9.12), puis lorsque le débit (Q) demandé augmente, la pression maximale donnée par la pompe diminue (de façon plus ou moins proportionnelle). Il existe un débit limite pour lequel cette pression est nulle (par exemple 4,2 m^3/h en vitesse 3 sur la courbe de la figure 9.12), c'est-à-dire que l'eau ne sort même pas de la pompe.

Le faisceau de courbes à pente positive représente la perte de charge d'un circuit à écoulement turbulent. Pour un circuit hydraulique donné, les variations de perte de charge sont proportionnelles au carré du débit : perte = RQ^2, où R est la résistance du circuit qui dépend de la longueur et du diamètre des canalisations.

Pour un circuit donné, lorsque l'on change la vitesse, on se déplace sur l'une de ces courbes jusqu'à l'intersection avec la courbe de pompe correspondante. À l'équilibre, on a donc P_{lim} = pertes, c'est-à-dire $RQ_{lim}{}^2 + AQ_{lim} = P_o - P_s$, où P_s = pression statique du circuit. À moins de travailler avec de très grosses sections de tuyau, on voit que les courbes de perte sont très raides. Vouloir augmenter le débit implique donc des pertes beaucoup plus grandes.

Grâce au premier essai avec les pompes Salmson, j'ai pu mesurer Q_{lim} pour différentes vitesses de pompe. J'en ai déduit R dans mon circuit, et je me suis convaincu que mon modèle de circuit était correct : pertes = 1,5 + 3,2Q^2 m, soit 5 m à 1 m^3/h.

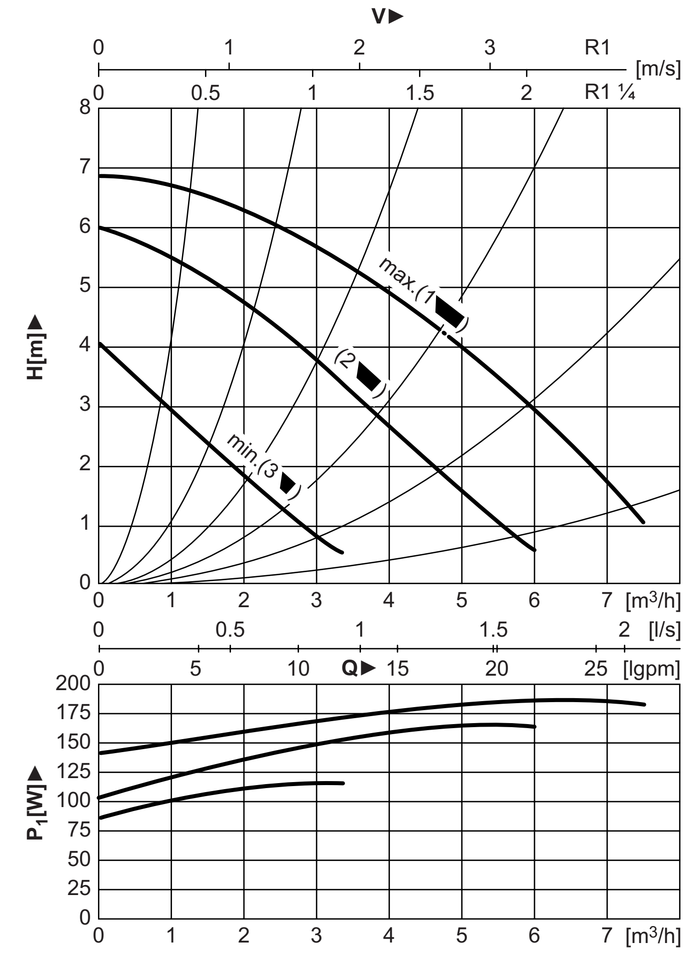


Figure 9.13
Diagramme de performances d'une pompe Wilo Top S (source : Wilo).

J'ai pris une pompe Wilo TOP-S 7, qui donne théoriquement 5,5 m à 1 m³/h en vitesse 2. Je suis effectivement un peu au-dessus, à 1,15 m³/h, depuis que je l'ai installée.

Figure 9.14
L'installation avec la pompe Wilo.
ⓐ *Compteur eau chaude (débitmètre).*
ⓑ *Pompe Wilo Top S 7.* ⓒ *Vers panneaux.*

Faut-il deux pompes pour faire un système autovidangeable ? Si les panneaux sont à une faible hauteur au-dessus du stock, la réponse est non. Dans mon système, je ne gère même plus la vitesse de la pompe pendant le remplissage.

La présence d'une seconde pompe sur le système Rotex ne s'explique que s'il y a une grande différence de hauteur. La seconde pompe, qui doit présenter une faible résistance à l'arrêt, n'est d'ailleurs pas forcément du même type que la pompe principale.

Eau chaude sanitaire

Comme indiqué dans *Utilisation de l'eau chaude sanitaire* (voir p. 108), le ballon solaire remplace la chaudière lorsqu'il est suffisamment chaud (la température est mesurée en haut du ballon). Si la température baisse, il est utilisé en série avec la chaudière. J'ai installé une vanne thermostatique (VTH1) sur l'eau chaude sanitaire pour éviter les accidents et les pertes.



Figure 9.15
Les composants pour l'installation de l'eau chaude sanitaire.
ⓐ *Eau chaude chaudière.* ⓑ *V3ECS.* ⓒ *Eau chaude solaire.* ⓓ *VTH1.* ⓔ *Eau froide.*
ⓕ *Départ ECS.*

Chauffage

La chaudière existante (de marque Geminox) comporte un ballon d'eau chaude sanitaire intégré de 100 l. Elle chauffe un stock d'eau selon un thermostat interne (à environ 60 °C). Une partie de l'eau provenant des radiateurs (réglable par V3R) entre dans la chaudière, et le tout est renvoyé dans le circuit par un circulateur (C4) commandé (TOR) avec un thermostat d'ambiance situé dans l'habitation. Le V3R régule donc la température de l'eau dans les radiateurs.



Figure 9.16
Circuit du départ vers les radiateurs.
ⓐ *V3ECS.* ⓑ *VTH1.* ⓒ *V3R.* ⓓ *C4.*
ⓔ *Eau froide VTH1.* ⓕ *Départ ECS.* ⓖ *AR.*
ⓗ *Départ vers radiateurs.*

La question est de savoir où insérer les calories provenant des panneaux (retour chaud de l'échangeur solaire).

L'insertion avant la boucle chaudière (en série sur le retour radiateurs) ne convient pas car tout le débit des radiateurs passe dans l'échangeur solaire, d'où une augmentation des pertes.

En parallèle, avec le retour chaud de la chaudière, n'est pas une bonne option car il faut que l'eau solaire soit très chaude (figure 9.18).

En série avec la chaudière, on chauffe aussi la chaudière, ce qui est inutile à la mi-saison (figure 9.19).

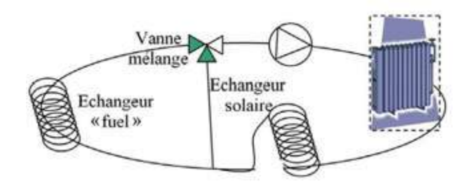


Figure 9.17
Schéma d'échangeurs mis en série sur le retour radiateurs.

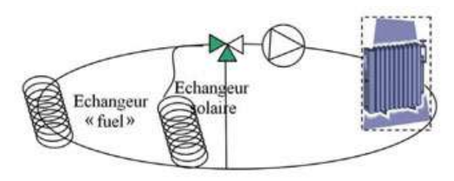


Figure 9.18
Schéma d'échangeurs mis en parallèle.

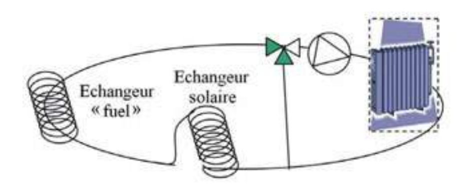


Figure 9.19
Schéma d'échangeurs mis en série avec la chaudière.

La solution choisie est d'envoyer l'eau, selon la température du stock solaire, soit dans le bas de la chaudière pour être réchauffée soit directement dans le circuit. Cela s'effectue de façon « passive » (sans intervention de l'automate) par une vanne trois voies thermostatique VTH2 utilisée à l'envers, en vanne distributrice (figure 9.20).

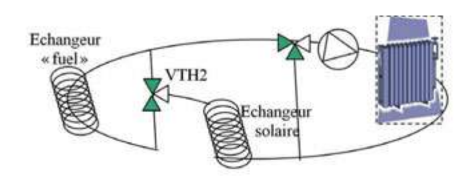


Figure 9.20
Schéma d'échangeurs mis en série avec la chaudière, avec court-circuit.

Une solution complète consiste, sur le schéma précédent, à court-circuiter l'échangeur solaire s'il est trop froid. Cela est fait par V3CH qui dirige l'eau revenant des radiateurs vers l'échangeur solaire ou vers la chaudière directement. De cette façon, on ne réchauffe pas le stock avec le fioul.

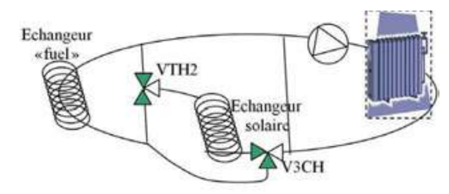


Figure 9.21
Schéma d'échangeurs mis en série-parallèle avec la chaudière.

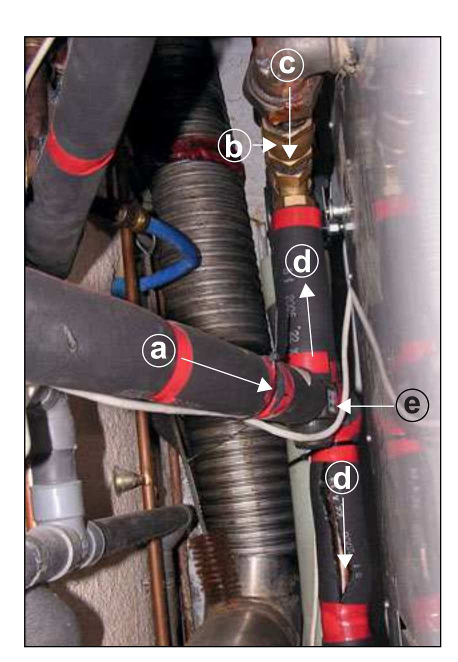


Figure 9.22
Circuit du retour des radiateurs.
(a) Arrivée échangeur stock. (b) AR. (c) Départ chaudière. (d) Retour direct radiateurs. (e) VTH2. (f) Retour chaudière.

Remarque : le circulateur actuel pour le chauffage circule trop fort, il y a sûrement une solution à trouver.

Capteurs

Choix du matériel

J'ai envisagé de construire mes propres capteurs. Mais le prix total (absorbeur en cuivre, tuyaux, carrosserie, vitrage, isolation) est moitié plus cher que les capteurs du commerce qui ont un revêtement sélectif et du vitrage trempé.

Le capteur à tubes sous vide donne un rendement amélioré de 10 à 30 % mais à un coût supérieur de 50 % avec des conditions d'utilisation strictes (surchauffe interdite). De plus, il s'agit d'un capteur long (2 m). J'ai donc rejeté cette solution. S'ajoutait l'absence de prise au vent, mais cet argument est souvent compensé par la présence de réflecteurs à l'arrière.

J'ai donc pris huit capteurs plans de 2,5 m^2 (soit 2,25 m^2 effectifs) proposés par l'Apper (marque Solimpek, type Marvel, version sans Solar Keymark).

Positionnement

Les capteurs sont situés au nord de la maison, à 2,60 m de haut pour ne pas être masqués par les toits. Ils sont installés horizontalement sur deux rangées de 8 m de long, distantes de 5 m pour que la première rangée ne fasse pas d'ombre



Figure 9.23
Les capteurs.

sur la seconde en décembre. Les capteurs sont orientés plein sud (à 5° près) et inclinés à 60° par rapport à l'horizontale.



Figure 9.24
Positionnement des capteurs sur la pergola.

Support

Les capteurs reposent sur une pergola en bois qui sert d'abri de voiture. L'ossature a été posée rapidement pour qu'elle se stabilise et sèche avant le montage des panneaux. Il y a 400 kg de capteurs sur six points d'appui (un mur et trois poteaux). Moins de 100 kg de charge par point plus les contrepoids représentent au total 200 kg par point d'appui.

Pour m'assurer de la solidité de l'installation, je calcule la dilatation entre acier, aluminium et cuivre sur 8 m de long, avec une différence de température de 40 °C. Le coefficient de dilatation de l'aluminium (Al) est $2{,}3 \times 10^{-5}$, celui du cuivre (Cu) $1{,}7 \times 10^{-5}$, celui du fer (Fe) $1{,}2 \times 10^{-5}$ et celui du bois 5×10^{-6}.

Le différentiel de dilatation entre le bois (pergola) et le cuivre (collecteurs) représente environ 5 mm sur 8 m.

Le différentiel entre Al (capteurs) et Fe (structure) est de 3 mm, c'est assez peu. Par précaution, j'ai finalement fait huit supports indépendants en ferraille soudée. Les dilatations se font donc sur 1,4 m au lieu de 8 m, on a alors une variation au plus de 0,6 mm.

Sur une longueur de 6 m avec une différence de température de 100 °C, on a une dilatation du cuivre de 10 mm, ce qui n'est pas négligeable. J'ai donc ajouté des raccords inox souples à chaque liaison panneau-collecteur.

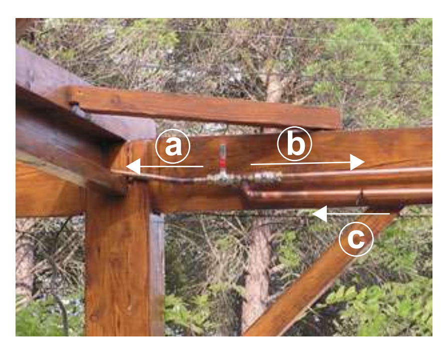


Figure 9.25
La pergola, les raccords en inox et les vannes manuelles.
(a) Vers rangée arrière. (b) Vers rangée avant.
(c) Arrivée eau froide.

La prise au vent des panneaux à 100 km/h nécessite un contrepoids de 80 kg par capteur (110 kg à 120 km/h). Pour cela, j'ai utilisé d'anciennes dalles de béton. Le vent de tempête vient plutôt d'est ici, il n'y a donc quasiment pas de prise. Et des arbres abritent du vent du nord. L'ensemble a depuis subi plusieurs fortes tempêtes sans problème.

Montage des panneaux

L'idée de mettre des vannes manuelles pour séparer les deux groupes de capteurs semble intéressante, mais ce n'est pas très compatible avec le système de vidange. Dans tous les cas, il faut veiller à positionner l'axe des vannes verticalement pour ne pas présenter de siphon lorsqu'elles sont partiellement fermées et éviter ainsi le risque de gel.

Les capteurs sont montés en deux groupes de quatre en quasi-Tickelman (voir le schéma global), et non en Tickelman classique (figure 9.26), l'intérêt étant une moindre consommation de cuivre.

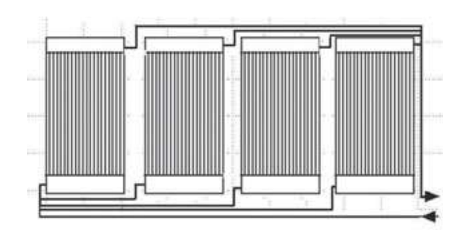


Figure 9.26
Montage de panneaux en Tickelman.

Mais, les deux collecteurs étant de diamètre constant, il circulait beaucoup plus d'eau dans les deux panneaux extrêmes que dans les panneaux centraux (dans un rapport supérieur à trois). L'eau était en ébullition au centre, et froide sur les deux panneaux de bord. Je m'en suis aperçu au bruit des bulles, et au comportement global de l'automate qui changeait anormalement selon que la sonde de température se trouvait dans l'un ou l'autre des panneaux.

Après de nombreuses mesures et de mutiples calculs, j'ai finalement installé des diaphragmes (indiqués dans le schéma global, voir p. 108) dans les capteurs extrêmes pour en limiter le débit – le diaphragme est un simple jeton de lavage percé d'un trou de 7 mm. Depuis, je n'ai plus ces déséquilibres.

Ce type de problème est encore plus conséquent si les panneaux sont montés en série (en mettant bout à bout les collecteurs internes). Des moyens de calcul des diaphragmes à implanter existent sur le site de l'Apper (saisir le mot-clé « équilibrage »).

Régulation

J'avais dans un premier temps conservé le compteur eau chaude qui était monté horizontalement mais tourné sur le côté – car en hauteur –, placé sur le flux d'eau chaude provenant des panneaux. Il a été hors d'usage rapidement, au bout de deux mois. Au démontage, il apparaît que c'est l'axe qui semble avoir mal supporté la position. Quand je l'ai remplacé, je l'ai placé en sortie de pompe, horizontalement, avec lecture par le dessus. Dans les faits, la mesure de débit n'est utile que lors du réglage initial de l'installation ; j'ai donc fini par le démonter.

J'ai conservé jusqu'à présent la régulation du chauffage de la maison existante :

- la chaudière a sa propre température de consigne (il y a donc une réserve, dont les 100 l d'eau chaude sanitaire) ;
- le circulateur se met en marche si la température ambiante est inférieure à la consigne. Cette consigne est gérée par un module (programmateur de base, acheté en grande surface de bricolage) avec prise en charge des modes jour, nuit, absences, etc.



Figure 9.27
Le module de programmation.

La régulation se fait en gérant huit sondes et sept actionneurs, dont une sonde et un actionneur pour la boucle d'eau chaude sanitaire (un seul actionneur en proportionnel – le contraire du TOR).

Actuellement, je me contente de couper ou non la chaudière avec l'automate, mais, à terme, j'aimerais récupérer les paramètres de celle-ci. Un automate ouvert m'a semblé indispensable pour pouvoir intégrer les diverses évolutions envisagées. J'ai choisi un Millenium II, qui propose de nombreuses entrées analogiques.

Une autre solution envisagée à l'époque était d'utiliser deux régulations « simples », l'une pour les capteurs et les ballons, l'autre pour la consommation d'eau chaude sanitaire et la boucle.

Les objectifs de la régulation et du schéma hydraulique ont été :

- de limiter les composants actifs (afin de réduire les coûts, mais surtout augmenter la fiabilité) ;
- de pouvoir fonctionner de façon autonome sans intervention autre que le changement de mode été/hiver (avec un interrupteur) et l'alimentation en eau chaude du lave-linge et du lave-vaisselle (avec des vannes manuelles) ;
- de pouvoir revenir de façon simple au mode de fonctionnement initial au fioul.

Ballons

Le ballon pour l'eau chaude sanitaire est de 600 l, de marque Ezinc, avec un double serpentin. Le deuxième serpentin servira éventuellement lorsque l'on changera la chaudière.

Pour le tampon de 1 500 l, j'avais pensé à une cuve à fioul, mais il y a un risque de mauvaise stratification et il est difficile de mettre un serpentin sans abîmer la cuve.

Il était préférable de se tourner vers une cuve alimentaire ou viticole. J'ai choisi une cuve en fibre de verre de 1 500 l à 700 €, complètement ouverte au-dessus, et suffisamment solide pour supporter le poids de l'échangeur.



Figure 9.28
La cuve pour le tampon.

Le poids de la cuve pleine est de 1,5 t, réparti sur $1\ m^2$ (la cuve vide ne pèse presque rien). Ce poids ne constitue pas un problème : cela reste moins lourd au mètre carré qu'une voiture sur ses quatre pneus.

L'isolation est mixte, laine de verre et Placoplâtre.

Circulation dans le stock

Située à un tiers du bas du stock, l'arrivée est constituée d'une canne en cuivre de diamètre 22 percée de trous.

Pour ne pas déstratifier[5], la vitesse de l'eau chaude sanitaire ne doit pas dépasser 0,1 cm/s. Le débit doit être de $1\ m^3/h$,

5 La stratification est le phénomène qui permet à l'eau chaude de ne pas se mélanger à l'eau froide dans un ballon, cette dernière s'accumulant en bas.

soit 0,27 l/s (voir *Circulateur*, p. 110), la surface des trous de la canne d'eau chaude sanitaire doit donc être au moins de 270 / 0,1 = 2 700 cm^2, soit environ $(51\ cm)^2$ – ce qui est beaucoup.

J'ai fait une vingtaine de trous de 10 mm de diamètre dans la canne, soit 18 cm^2, donc v = 15 cm/s. J'ai ensuite ajouté un stratificateur que j'ai fabriqué, constitué d'un tube PVC (gouttière) percé de fentes sur toute la hauteur avec une jupe conique qui descend au fond du stock.



Figure 9.29
Le stratificateur.

Rotex ne propose rien à ce sujet, mais la forme et le volume du ballon Rotex ne s'y prêtent peut-être pas. Quoi qu'il en soit, un débit de 1 m^3/h dans une cuve de 1,5 m^3 ne détruit-il pas la stratification de toute façon ?

À l'aspiration, au fond du stock, j'ai installé une canne en PVC qui a la forme d'un demi-cercle. Ce tube est percé de nombreux trous orientés vers le fond.



Figure 9.30
La canne d'aspiration.

Je constate que la stratification ne fonctionne pas bien. La jupe était sans doute inutile ; j'ai fini par la supprimer et j'ai fermé le tube en bas. La stratification est toujours faible :

- avec un débit de 1 100 l/h, on remue l'ensemble du stock en 1 h ¼, cela n'aide pas ;
- il semble que le rapport hauteur/diamètre de ma cuve égal à 2 ne facilite rien ;
- une stratification importante est nécessaire dans un système combiné chauffage + eau chaude sanitaire dans le même stock : cela permet de puiser une eau « chaude » sanitaire qui soit chaude. Dans le cas d'un stock de chauffage séparé, il est surtout important de stocker des calories. Une grande quantité d'eau tiède fait (ou « devrait » faire) tout aussi bien que la moitié d'eau chaude. Une simulation d'un système en fonction du niveau de stratification du stock (inférieur à 2 000 l) ne montre pas un écart de rendement réellement significatif dans des conditions réalistes.

Échangeur de chauffage

Pierre Amet m'a orienté vers un échangeur constitué de trois radiateurs en tôle (60 × 60 × 10 cm) montés en Tickelman. Cette solution offre une grande surface d'échange (16 m^2) et une vitesse des fluides réduite (d'un tiers). En tenant compte du fait que le fer est moins bon conducteur de chaleur que le cuivre (huit fois moins), j'ai l'équivalent d'un échangeur en cuivre de 2 m^2 mais où l'eau circule moins vite.



Figure 9.31
L'échangeur, constitué de trois radiateurs.

Après dix-huit mois d'utilisation, je peux garantir que cet échangeur fonctionne réellement : l'eau qui en sort est à la température du stock.

Couplage du ballon d'eau chaude sanitaire, du tampon et des capteurs

Un système type Rotex est très simple (et donc fiable). Il suffit de respecter la pente des tuyaux. Coupler un ballon d'eau chaude sanitaire a compliqué le circuit.

Le couplage des trois éléments se fait par le circulateur et une vanne trois voies (V3PS) afin de pouvoir choisir de pomper dans le tampon ou dans le ballon.

Il faut également pouvoir rediriger l'eau de retour des capteurs soit vers le stock soit vers le ballon. Pour augmenter la fiabilité, j'ai recherché une solution sans électrovanne. J'utilise un ébulleur construit dans un système de filtre à cartouche dont j'ai percé le fond, auquel j'ai adapté un raccord trois quarts pour faire une troisième entrée.



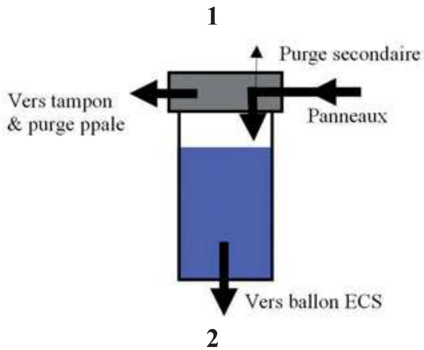


Figure 9.32
Système de filtre à cartouche, avant modifications (1) et après modifications (2).

Au repos, l'eau dans le bol est au niveau du stock. Lorsque le système pompe de l'eau qui provient du tampon, l'eau issue des capteurs se dirige vers le tampon (en chassant l'air), car il n'y a pas de dépression en bas du bol. Au contraire, si l'eau des panneaux vient du ballon, il y a une dépression au fond du bol, et l'eau ne va plus vers le tampon. Cela fonctionne car, avec ce type de système, il entre exactement autant d'eau en haut qu'il en sort en bas (celle qui est passée par la pompe).

La première version pompait au démarrage systématiquement dans le tampon pour remplir et purger le circuit, puis basculait sur l'eau chaude sanitaire à la fin de la purge. En été, cela avait l'inconvénient d'envoyer de l'eau froide (plus froide que celle du ballon d'eau chaude sanitaire) dans les capteurs : cela les refroidissait en dessous de la température de l'eau chaude sanitaire, ce qui arrêtait la pompe. Le système oscillait alors, et chauffait le tampon sans chauffer l'eau chaude sanitaire.

Il faut donc pouvoir amorcer le système aussi bien depuis le stock que depuis le ballon d'eau chaude sanitaire. Le problème est de trouver les 20 l d'eau nécessaires au remplissage des panneaux et de la tuyauterie.

J'ai d'abord essayé la solution de siphonner ce volume d'eau directement dans le tampon avec, en option, de faire passer cette eau dans le serpentin haut du ballon pour être sûr d'envoyer de l'eau chaude. L'inconvénient est que cela refroidit un peu le haut du ballon. Dans cette option, un anti-retour empêchait l'eau de passer par le serpentin haut lors de la vidange des panneaux. Par sécurité, j'ai ajouté un deuxième bol ébulleur à l'entrée du serpentin bas au cas où le siphon s'amorce mal (ou contient de l'air).

Après deux semaines de fonctionnement (en été), j'ai remarqué que le stock se réchauffait aussi, presque au même niveau que le ballon. J'ai remplacé quelques tuyaux de cuivre par des tubes transparents pour mieux analyser les choses : l'eau empruntait deux chemins, l'un passait par le stock et l'autre par le siphon d'amorçage.

Maintenant, je procède de façon « classique » avec un réservoir indépendant qui se vide au départ dans le circuit du ballon. J'ai utilisé pour cela un ancien chauffe-eau sous évier de 30 l. Son trop-plein (l'ancienne sortie eau chaude) se vide dans le stock par une mise à l'air. Je continue à utiliser le serpentin haut comme stock (environ 10 l). Dans tous les cas, ces stocks intermédiaires circulent dans le serpentin bas avant d'être pompés vers les panneaux pour ne pas y injecter de l'eau éventuellement froide.



Figure 9.33
Réserve tampon dans un chauffe-eau sous évier. (a) Purges et mise à l'air. (b) Retour des panneaux. (c) Réserve tampon pour remplissage panneau.

L'été est passé. L'expérience montre que l'idée du vieux chauffe-eau comme réserve est à ranger au rayon des fausses bonnes idées. Suite à divers cycles chaud-froid, il arrive en effet que l'eau monte au-dessus de la sortie eau chaude, lors de

la vidange il se forme alors un vide d'air qui empêche plus ou moins longtemps l'eau de se vider dans le circuit.

J'utilise maintenant un vase d'expansion classique dont j'ai percé la valve (mais pas la membrane).

Isolation thermique des tuyaux

Les capteurs solaires ainsi que le circuit de l'échangeur chauffage sont reliés par une tuyauterie en cuivre. Bien que débutant en plomberie, cela n'est pas très compliqué.

Le reste des liaisons est fait en PER (polyéthylène réticulé). Étant donné le coût des raccords, le fait que ce matériau soit mou, la difficulté à isoler ces éléments flexibles, surtout lorsqu'ils sont gainés, et la dilatation importante qu'ils subissent liée aux écarts de température me laisse sceptique quant au choix de ces tuyaux. Peut-être faut-il les réserver aux grandes longueurs.

L'isolation est faite par des manchons de 13 mm d'épaisseur à l'intérieur des bâtiments et sur les collecteurs chauds en haut des panneaux. À l'extérieur, le reste des tuyaux est caché dans des coffres en bois (voliges) remplis de mousse expansive et de polystyrène.

Figure 9.34
La surface du stock.
ⓐ Mises à l'air. ⓑ La sortie des mises à l'air est au-dessus de la surface libre. ⓒ Pavés de mousse découpés et déposés à la surface de l'eau pour 1re isolation.

La surface du stock est isolée par des plaques de mousse flottantes posées à la surface de l'eau puis, sur le couvercle époxy, par une couverture air-bulle et laine de roche.

Cette forme d'isolation n'était pas non plus une bonne idée : au bout d'un certain temps, les pavés de mousse coulent au fond et finissent par gêner la circulation. Je les ai donc retirés et j'ai soigné l'isolation au-dessus du couvercle (polystyrène extrudé).

Sondes et vannes trois voies

Les sondes

Pour mesurer la température, j'ai utilisé deux types de sonde.

- Des sondes PT1000 pour le stock, l'eau chaude sanitaire, les capteurs et le retour des radiateurs : ces sondes sont plus fiables, répétables[6], et précises. On peut les changer dans cinq ans sans avoir à faire de recalibration. Elles sont intégrées dans des doigts de gant maison (figure 9.35).
- Des sondes électroniques pour la température extérieure et la boucle d'eau chaude sanitaire : elles sont moins chères et plus faciles à interfacer avec le Millenium II. Ces sondes sont fixées avec un adhésif à l'extérieur du tuyau à mesurer en prenant soin de scotcher également une bonne longueur de fil autour dudit tuyau. Sans cette précaution, il est en effet difficile de savoir si on mesure la température du tuyau ou celle du fil.

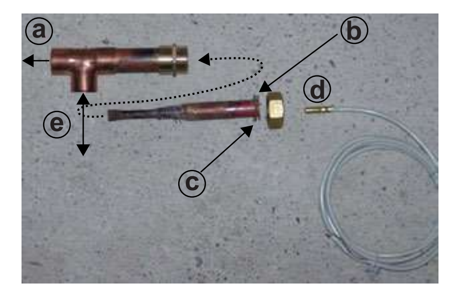


Figure 9.35
Doigt de gant maison.
ⓐ, ⓔ Circulation de l'eau. ⓑ Collet battu. ⓒ Joint fibre. ⓓ Sonde PT1000.

Les vannes

Les vannes thermostatiques sont de type industriel (calibrées) et équipées d'un anti-retour miniature intégré dans le tuyau.

Les autres vannes trois voies sont des vannes à sièges (TOR). Le moteur est de type thermique : en présence de courant, une pièce chauffe, se dilate et appuie sur la tige de commande de la vanne.



Figure 9.36
Vannes et sonde PT1000 utilisées.
ⓐ Sonde PT1000. ⓑ « Moteur » de la vanne 3 voies. ⓒ Vanne thermostatique. ⓓ Antiretour. ⓔ Vanne 3 voies (à siège).

Programmation du Millenium II

La première programmation du Millenium II que j'ai réalisée est présentée ici. Je me suis attaché plus à la description des diverses fonctions à réaliser qu'à leur

6 La répétabilité est la capacité à donner plusieurs fois la même mesure dans des conditions semblables.



Figure 9.37
Le Millenium.

programmation dans le Millenium. Quelques modifications, faites suite au premier hiver, sont également détaillées.

Gestion de la température des radiateurs (V3R)

L'objectif est de gérer la vanne mélangeuse du chauffage (V3R) pour maintenir une température de retour des radiateurs la plus basse possible (25 à 30 °C).

C'est une vanne à secteur. Lorsqu'elle est actionnée dans le sens « + », elle ferme la chaudière.

Dans le principe, si T_r (la température de retour des radiateurs) est comprise entre 25 et 30 °C, on n'a rien à faire. Au-delà de 30 °C, on actionne la vanne à l'ouverture pendant 10 s toutes les minutes. Cette fonction n'est activée que si le circulateur C4 (pour le chauffage) fonctionne. En été, elle n'est pas appelée, on fait passer cette vanne dans la position qui ferme la chaudière.

La consigne de 25 à 30 °C a été modifiée en fonction de la température extérieure : elle augmente lorsque la température baisse.

Gestion de l'échangeur du chauffage (V3CH)

Le but est de gérer la vanne trois voies à deux états (V3CH) qui dirige le retour des radiateurs vers l'échangeur solaire ou vers la chaudière.

C'est une vanne à siège. Au repos électrique, l'eau va directement vers la chaudière.

Il y a aussi une vanne thermostatique qui dirige l'eau de retour de l'échangeur solaire soit directement vers les radiateurs soit vers la chaudière, de façon « passive » (vu du logiciel).

Dans le principe, si T_r est plus basse que la température haute de l'échangeur (T_{Sh}), l'eau va vers l'échangeur.

La fonction $T_{Sh} - 3 < T_r < T_{Sh} - 5$ n'est activée que lorsque C4 fonctionne, elle est donc au repos en été.

Gestion de l' eau chaude sanitaire (V3ECS et ChôdOff[7])

L'objectif est de gérer la vanne trois voies à deux états (V3ECS) qui dirige l'appel d'eau chaude depuis la chaudière ou depuis le ballon solaire. En été, cette fonction coupe également complètement la chaudière qui ne peut être rallumée que sur intervention de l'utilisateur ; cette remise en route s'annule au bout de 10 h.

C'est une vanne à siège. Au repos électrique, l'eau chaude vient de la chaudière.

Dans le principe, si T_{Bh} (la température haute du ballon d'eau chaude sanitaire) dépasse 45 °C, on passe sur le ballon solaire. En été, cela coupe la chaudière (électriquement).

Lorsque T_{Bh} est inférieure à 43 °C, on passe par la chaudière qui contient alors 100 l d'eau froide, ce qui n'a aucun intérêt.

Un bouton permet d'allumer la chaudière en été (pour éviter les 100 l d'eau froide), il est remis à zéro au bout de 10 h. Il n'a jamais servi pour l'instant.

Gestion des panneaux (V3PS, C1 et C2)

Il s'agit de gérer les capteurs solaires, point essentiel du système. L'objectif est de chauffer le tampon pour le chauffage ou le ballon d' eau chaude sanitaire, et d'assurer diverses fonctions de sécurité. En hiver, il faut chauffer en priorité le stock de chauffage, puis préchauffer le ballon d'eau chaude sanitaire à une température basse (20 °C). En été, seul le ballon d'eau chaude sanitaire est chauffé jusqu'à 70 °C. Ensuite, si cela est nécessaire pour empêcher la surchauffe des panneaux, l'eau circule dans le tampon de chauffage.

Les objets à gérer sont :

- la vanne V3PS (une vanne à siège) qui permet de choisir entre le stock et le ballon d'eau chaude sanitaire. Au repos électrique, l'eau est pompée du stock ;
- le circulateur (et sa vitesse).

Des fonctions annexes (inspirées de la notice Rotex) sont également définies.

- Le circulateur est mis en route deux secondes tous les jours pour éviter le gommage.
- La vidange des panneaux se fait dans le circuit du ballon si le remplissage des panneaux s'est fait par le circuit du ballon (pour éviter un débordement du stock).
- Si la température des panneaux (T_c) est élevée, la vitesse du circulateur est augmentée (cette fonction est abandonnée pour l'instant).

7 ChôdOff est le nom d'une variable de l'automate qui signifie « Chaudière éteinte ».

- En hiver, pour éviter le gel, on n'enclenche la pompe que s'il fait assez chaud (d'après un thermomètre), on laisse ensuite le moteur tourner pendant un temps minimal (deux fois le temps de purge) pour s'assurer qu'il ne se forme pas de glaçons. Si la température extérieure est trop basse (négative pour simplifier), on vidange le circuit – mais il faut savoir que, dès qu'il y a du soleil, les capteurs sont 30 °C plus chauds que la température ambiante, et il arrive donc souvent que les capteurs soient chauds alors qu'il gèle.
- Inversement, si les capteurs sont près de la température d'ébullition, on vidange pour éviter la diminution du niveau d'eau dans le stock. La question devient alors : « Que devient, à long terme, un capteur sans eau ? » Cette fonction est donc abandonnée pour l'instant.

Gestion de V3PS

Quand V3PS est au repos, il est orienté vers le stock.

En hiver, tant que le bas du ballon d'eau chaude sanitaire (T_{Bb}) est à moins de 20 °C, V3PS est orientée vers le plus froid des deux tampons. Ceci dit, le matin, l'eau chaude sanitaire est toujours privilégiée. Comme on commence par chauffer une eau très froide, la pompe démarre très tôt le matin, au moins une heure avant que la température des capteurs soit suffisante pour chauffer le stock de chauffage. Cette eau chaude sanitaire est « gratuite ».

Lorsque T_{Bb} est à plus de 20 °C, on chauffe le stock. J'ai fait une modification récente pour tenir compte du paramètre suivant : si l'écart entre T_c et T_{Sb} (différence de température entre les panneaux et le stock) devient trop faible, on repasse au chauffage de l'eau chaude sanitaire (qui est plus froide que le stock de chauffage). Avec cette modification, j'ai gagné 5 °C sur l'eau chaude sanitaire les jours ensoleillés puisque je gagne 1 h de pompage le soir également. Et surtout, je réussis à chauffer l'eau chaude sanitaire par mauvais temps de façon très significative.

Installer deux stocks

L'utilisation de deux stocks indépendants trouve une justification intéressante si on gère les priorités avec souplesse. Chaque kilowattheure capté est un kilowattheure économisé. Il convient donc d'éviter les extrémismes du type « en hiver : que du chauffage ».

En été, on ne chauffe que le ballon d'eau chaude sanitaire, jusqu'à 70 °C. Au-delà, le stock de chauffage est utilisé pour éviter une surchauffe des capteurs.

La nuit, V3PS est forcée au repos (sur le stock).

Gestion de C1 et C2

C2 correspond à la vitesse haute de C1 ou à une deuxième pompe.

▶ Conditions de mise en route

En été, on démarre le circulateur si les panneaux ne sont pas trop chauds, s'il y a un écart de température suffisant entre les panneaux et le ballon, et que le ballon n'est pas déjà chaud, ou encore si l'on est en mode « Boost » et s'il y a un écart suffisant entre les panneaux et le stock. Le mode Boost correspond au cas où les panneaux sont très chauds ; on cherche alors à récupérer plus (et plus vite) de chaleur. Il protège les panneaux contre la surchauffe, et l'eau contre l'ébullition.

En hiver, on démarre le circulateur si les panneaux sont suffisamment chauds et s'il y a un écart suffisant entre les panneaux et le ballon ou entre le panneau et le stock.

Un écart suffisant entre les panneaux et le ballon ou le stock est de 10 °C environ.

▶ Condition d'arrêt

En été, on arrête le circulateur :

- si on dépasse la température d'ébullition dans les panneaux ;
- s'il n'y a plus d'écart entre les panneaux et le ballon ;
- si le ballon est chaud et s'il n'y a plus d'écart entre les panneaux et le stock en mode Boost.

Un écart « insuffisant » est de l'ordre de 2 °C.

▶ La mise en route

La pompe est activée au minimum une fois par 24 h pendant 2 s contre le gommage.

Si la mise en route de la pompe est activée, il y a une durée minimale ininterruptible (contre le gel en particulier).

Si les panneaux dépassent 80 °C, on augmente la vitesse (ce mode de fonctionnement est abandonné pour l'instant).

Gestion de la boucle d'eau chaude sanitaire

Le circuit d'eau chaude sanitaire de la maison est très long, et les points de puisage principaux d'eau chaude sont très éloignés du stock : on jette entre 3 et 5 l d'eau froide avant d'avoir de l'eau chaude. Ce n'est pas écologique, et cela empêche de se servir de l'eau chaude pour le lave-vaisselle (qui semble utiliser moins de 10 l). Pour éviter cela, on fait circuler l'eau chaude dans une boucle lorsque cela est nécessaire (aux heures de puisage) et possible (l'eau chaude solaire est assez chaude).

Le principe est que, si T_{Boucle} est inférieure à 45 °C et T_{Bh} (température du haut de l'eau chaude sanitaire) supérieure à 60 °C (cela n'arrive que si l'on est en eau chaude sanitaire solaire) et que l'on est dans certains créneaux horaires (6 h, 12 h, 18 h), on active la pompe C3.

Display

Compteur de calories

J'ai abandonné le compteur de calories pour plusieurs raisons, la dernière étant la meilleure (au moins l'été) :

- il utilise beaucoup des capacités du Millenium II ;
- il est imprécis car je n'avais pas la température d'entrée de l'eau froide dans les panneaux à l'époque ;
- en été, le système est capable de produire plus d'énergie que l'on en consomme, les calories mesurées sont donc celles qui ont été consommées la veille, ce qui n'a aucun intérêt.

Affichage

Les huit températures puis l'heure s'affichent de façon cyclique. Pour un débogage ponctuel, la version actuelle indique également la durée de pompage en mode eau chaude sanitaire, la durée de pompage en mode chauffage (du stock), le nombre de mises en route de la pompe, et le nombre de commutations entre l'eau chaude sanitaire et le stock.

Interfaçage et câblage

J'ai utilisé des sondes PT1000 (voir *Sondes et vannes trois voies – Les sondes*, p. 118).

J'ai réalisé l'interfaçage des sondes avec le Millenium II à partir de convertisseur PT1000 -> 4-20 mA (un seul composant actif par sonde) et d'amplificateurs simples pour les deux sondes électroniques.

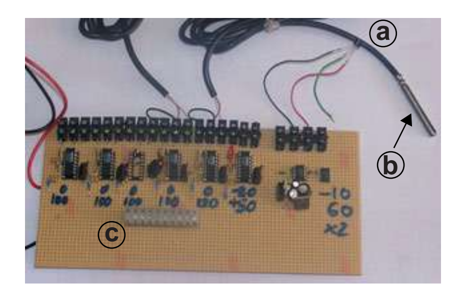


Figure 9.38
Interface Millenium-sondes.
(a) AD22100. (b) PT1000. (c) Carte conversion PT1000 et AD22100KT en 0-10 V.

Le coût global de l'interface est de 15 € par sonde. Il n'y a aucun réglage : j'utilise la fonction « Gain » du Millenium pour la calibration.

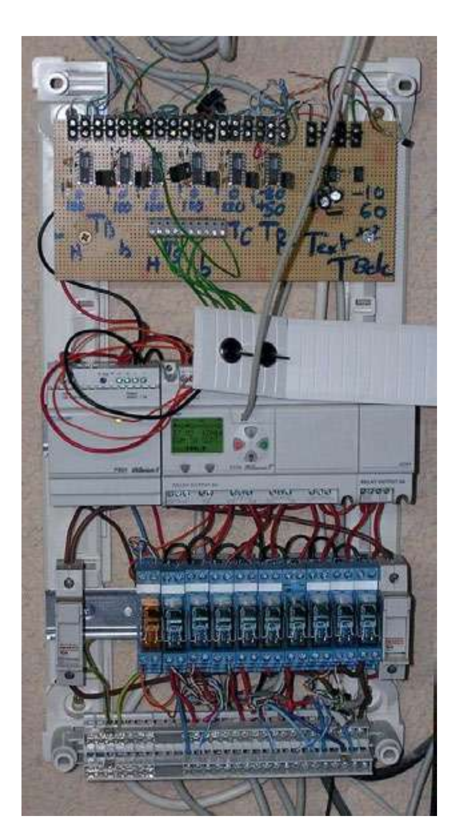


Figure 9.39
Millenium câblé, en situation.

J'ai ajouté sur chaque sortie du Millenium un relais à deux contacts (repos et travail) pour plus de liberté et pour protéger les relais internes du Millenium II. C'est probablement un peu luxueux.

Toutes les sondes utilisent des paires blindées (câble type RJ45 pour une liaison Ethernet). Le blindage est relié au 0 V côté Millenium, et il est en l'air de l'autre côté (malgré les vastes débats sur ce sujet, j'en suis content).

Retour d'expérience

L'ensemble du programme rentre juste dans le Millenium II. Cela fonctionne de façon fiable, mais je pense que la gestion de huit sondes avec un Millenium II est une limite quasi infranchissable.

Pour diverses raisons (extension future à la gestion du chauffage en particulier), je suis désormais passé au Millenium III, dans lequel il y a beaucoup plus de place. Je le recommande à tous ceux qui veulent installer un système avec plus de six sondes de température.

Bilan et perspectives

Production

Premières journées

Suite à une longue période de mauvais temps, mon eau chaude sanitaire était quasiment vide un beau matin d'octobre. Partant d'un ballon quasi homogène en température, je suis arrivé en surchauffe (T_{Sh} > 82 °C) dans la journée, après 6 h de pompage.

Cela correspond, d'après mes calculs, à une production de plus de 40 kWh[8], en tenant compte du fait que ce rendement était diminué car, après la surchauffe de l'eau chaude sanitaire, le stock a été chauffé par intermittence pour protéger les panneaux.

8 Ces résultats sont obtenus malgré un élément negatif : les tuyaux collecteurs extérieurs (environ 36 m) ne sont pas encore isolés, ce qui entraîne des pertes supplémentaires.

D'après le site Internet Switch[9], l'énergie disponible en octobre chez moi sur des panneaux inclinés à 60° est de 4,55 kWh/m^2 par jour.

Avec huit capteurs de 2,25 m^2, les 40 kWh produisent au mètre carré 40 kWh / (8 x 2,25) = 2,22 kWh. Le rendement supposé est donc : 2,22 / 4,55 = 0,48, ce qui signifie que le rendement global de l'installation est égal ou supérieur à 48 %.

Ce calcul comporte des raccourcis et des imprécisions, notamment concernant la période où le stock a été chauffé. Mais, même s'il faut le prendre avec prudence, ce résultat reste très positif : ces panneaux sont mécaniquement très fiables et ils semblent tenir leurs promesses sur l'aspect thermique.

Relevé journalier de la production de chaleur par mon système (février et mars 2007)

Date	kWh Produits	T° Exterieure (°C)	Heure Debut Pompage	Durée Pompage	T_{ECS} Matin (°C)	T_{ECS} Soir (°C)	T_{Stoc} k Matin (°C)	T_{Stoc} k Soir (°C)	kWh Excédentaires ECS	kWh Excédentaires Stock
16 fév.	57,3	13,9	9 h 06	7 h 17 min	14,5	22,9	50,1	72,2	5,9	38,5
17 fév.	10,9	8,4	9 h 35	4 h 25 min	16,6	30,5	51,6	51,6	9,7	0,0
18 fév.	0,0	4,3	0 h	0 h	20,6	20,8	39,3	39,3	0,1	0,0
19 fév.	57,6	10,3	9 h 05	7 h 16 min	12,9	21,0	32,8	58,3	5,7	44,6
20 fév.	55,8	11,4	9 h 08	6 h 54 min	14,8	22,7	47,3	67,1	5,5	34,5
21 fév.	4,5	8,9	11 h 06	1 h 24 min	15,9	21,4	50,2	50,3	3,8	0,3
22 fév.	17,9	9,2	9 h 21	2 h 54 min	14,8	22,9	38,9	45,0	5,7	10,6
23 fév.	36,9	10,3	9 h 24	5 h 55 min	15,4	37,3	39,0	49,6	15,3	18,4
24 fév.	6,2	7,8	10 h 43	2 h 21 min	22,4	31,7	40,6	40,6	6,5	0,0
25 fév.	0,0	5,0	0 h	0 h	25,8	25,9	35,5	35,5	0,0	0,2
26 fév.	40,0	10,0	8 h 57	5 h 21 min	18,5	33,6	30,5	48,5	10,6	31,5
27 fév.	54,4	11,8	9 h 56	6 h 35 min	29,8	40,0	40,0	63,0	7,1	40,2
28 fév.	21,3	14,4	13 h 37	3 h 04 min	35,7	42,3	46,3	53,5	4,6	12,5
1er mars	4,7	11,9	11 h 47	1 h 21 min	37,0	39,5	42,8	44,0	1,7	2,1
2 mars	36,3	16,2	10 h 16	5 h	31,2	42,7	38,2	52,2	8,0	24,5
3 mars	0,8	10,1	5 h 16	3 h 50 min	37,4	37,4	47,8	48,8	0,0	1,7
4 mars	45,2	16,8	9 h 12	6 h 39 min	27,1	45,5	37,2	53,6	12,8	28,7
5 mars	7,7	13,8	10 h 36	2 h 47 min	28,0	35,5	46,7	46,7	5,2	0,1
6 mars	6,8	10,5	9 h 01	2 h 07 min	23,0	32,5	38,8	40,3	6,6	2,4
7 mars	26,1	12,3	9 h 04	4 h 21 min	22,4	32,8	35,7	48,2	7,3	21,7
8 mars	45,3	13,6	9 h 29	7 h 09 min	22,1	34,8	40,8	59,3	8,8	32,2
9 mars	52,9	14,6	9 h 14	7 h 14 min	26,5	39,3	49,8	68,9	8,9	33,4

9 *Solar water integrated thermal cooling and heating systems* : http://fernande.cma.fr/switch/

Autres résultats

▶ Une journée en octobre

Au cours de cette même journée d'octobre, un peu ventée, la température n'a pas dépassé 20 °C. L'eau chaude sanitaire ayant atteint 82 °C, cela veut dire qu'à un moment ou un autre il y a eu 62 °C d'écart entre les panneaux et la température ambiante. C'est très encourageant pour l'hiver, quant à la différence de température que l'on peut obtenir. Ce grand écart de température n'a forcément pas augmenté le rendement mesuré ce jour-là, comme le montre la courbe de la figure 9.40.

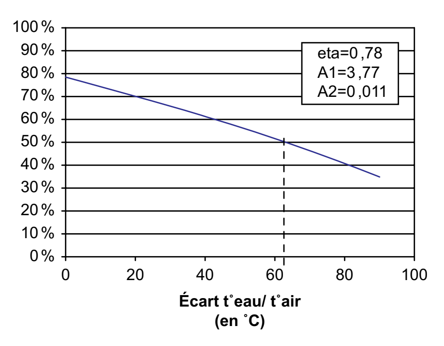


Figure 9.40
Courbe de rendement de mes panneaux.

▶ Deuxième exemple en hiver

La consommation hivernale n'est pas facile à mesurer parce que les calories sont consommées au fur et à mesure qu'on les produit. Autour du 11 novembre, j'ai eu une journée sans trop de consommation, le stock s'est élevé de 21 °C et le bas de l'eau chaude sanitaire de 10 °C, soit $21 \times 1500 / 860 + 10 \times 300 / 860 = 40$ kWh (au moins) produits. Le site http://fernande.cma.fr/switch/ donne en novembre 3,7 kWh/m²/jour de disponible soit, avec 18 m², 66 kWh d'où un rendement de 40 / 66 = 60 %, ce qui est très bien.

Suivi de production sur un mois

Depuis la mi-février, je suis passé au Millenium III et j'ai ajouté deux sondes qui mesurent la température d'entrée dans les panneaux et celle de sortie. Connaissant le débit, je suis capable d'estimer les kilowattheures absorbés par le système en dehors de la consommation simultanée des calories (bien que cela n'ait rien d'indispensable pour faire fonctionner un SSC : cela relève de la curiosité scientifique).

Bien entendu les écarts de température soir-matin ne sont pas directement liés aux kilowattheures captés dans la mesure où la consommation d'eau chaude dans la journée diminue cet écart.

En conclusion, j'ai découvert que le temps n'était pas toujours beau en Provence (en particulier depuis la mi-février pour cette année 2007).

Ma surprise la plus grande a été de constater que les capteurs solaires, même plans, marchent à l'ombre : les jours de mauvais temps, on arrive tout à fait à maintenir l'eau chaude sanitaire à des températures étonnantes. En termes de différence de température entre extérieur-eau chaude sanitaire, on arrive très facilement à plus de 20 °C d'écart.

C'est une conclusion préliminaire (et récente) à propos de mon installation à deux stocks. Fin septembre, au vu du temps de mise au point, j'avais fini par avoir des doutes sur l'utilité de ces deux stocks. En observant le fonctionnement cet hiver, je n'ai plus aucun regret. L'eau chaude sanitaire est en fait préchauffée « gratuitement » une heure le matin et une heure le soir à des moments où, de toute façon, l'ensoleillement est insuffisant pour le stock de chauffage. L'eau froide étant à 6-8 °C au robinet, j'économise 20 à 25 °C sans impact sur la température du stock chauffage. Le fait de disposer de deux stocks permet, en cas de petit temps, de ne chauffer que le stock le plus froid.

Bilan financier

Le tableau proposé en page suivante reprend les différents composants de mon installation et leur coût. Le lecteur pourra s'en inspirer pour établir son propre devis – au moins une version initiale –, ou pour connaître le coût des composants.

Le prix des capteurs est important, mais il y a aussi beaucoup d'à-côtés. L'écart entre le devis que j'avais réalisé et le réel se situe surtout au niveau du poste « intégration ». L'abri de voiture sera mieux couvert que prévu ; l'arrière des capteurs, inesthétique, sera caché.

Il faut ajouter à ces coûts environ 70 journées de travail, seul sur le chantier (juste aidé pour la peinture de l'abri et la pose des poutres et des capteurs) : recherche de documentation, conception du schéma, réalisation de l'abri, et une dizaine de jours de modification et de mise au point de l'utilisation des deux stocks.



Figure 9.41
Vue arrière des capteurs.

Répartition des coûts

Description	Quantité	Prix unitaire (en €)	Source	Sous-total (en €)	Total (en €)
Capteurs	8	350	Apper solaire	2 800	**2 800**
Support Capteurs					**1 238**
Poutre 20 x 20 (3 m)					
Poutre 10 x 22 (6 m)					
Chevrons 5 x 7 (4,5)					
Chevrons 10 x 7 (4,5)	1	512	Scierie Aix-en-Provence	512	
Intégration (bois, lasure , etc.)	1	726	Divers	726	
Fixation des capteurs	1	0	Récupération	0	
Plomberie de base					**966**
dont cuivre et PER				**254**	
dont isolation				**113**	
dont raccords et vannes				**599**	
Cu 22	35	3,1	LM	108,5	
Cu 20	0	3,1	QA	0	
Cu 18	35	2,44	BD	85,4	
PER 20/25	25	1,48	BD	37	
PER 13/16 + gaine	25	0,92	BD	23	
Manchons isolants	1	113	BD	113	
Échangeur chauffage (radiateurs)	3	26,62	BD	79,86	
Coudes, raccords, joints, vannes et divers	1	519		519	
Stocks					**1 903**
Ballon ECS	1	1 016	Piac 600 L	1016	
Tampon 1 500 l	1	837,2	Technirel	837,2	
Isolation tampon	1	50	LM + Récupération	50	
Coffre tampon	1	0	Récupération	0	
Composants de la régulation					**1 869**
Vannes thermostatiques	2	143,5	PIAC	287	
Vannes 3 voies TOR	3	143,5	PIAC	430,5	
Sondes	6	13,75	PIAC	82,5	
Doigts de gant	0	0	Fait « maison »	0	
Installation électrique	1	72	LM	72	
Régulation	1	720	Radiospare	720	
Compteur	1	50	QA	50	
Circulateur	1	227	JS	227	
Outillage et consommables		683	Divers	683	**683**
Boucle circulation ECS					**304**
Vanne thermostatique	1	143,5	PIAC	143,5	
Circulateur	1	160	JS	160	
Total complet					**9 763**
Total chauffage + ECS seuls (hors abri, intégration, outillage, consommables, boucle ECS)					**7 538**
« Rentabilité » (base économie de 1 100 l/an à 0,90 €)				Années :	**9,9**
« Rentabilité » chauffage + ECS seuls				Années :	**7,6**

Les coûts

Consommation énergétique antérieure : 2 250 l de fioul environ.

Économie d'énergie réalisée : 750 l de fioul environ la première année, 1 100 l environ la deuxième (passage à des murs chauffant).

Coût de l'installation : 7 538 €.



Figure 9.42
Vue arrière pendant les travaux d'intégration.

Bilan technique et perspectives

Depuis que j'ai mis des panneaux solaires, on n'a jamais vu hiver aussi chaud : le solaire, cela fonctionne ! Nous sommes en mars 2007, j'estime mon économie de fioul sur 12 mois à 750 l. L'hiver 2006-2007 n'est pas très significatif mais le suivi de ma consommation de fioul depuis 8 ans n'indique pas d'énormes variations d'une année sur l'autre : à plus ou moins 100 l près, j'ai eu une consommation constante.

Cette économie de 750 l, c'est un peu moins que ce que j'espérais. Mais c'est finalement un très bon résultat si l'on considère que je suis chauffé avec des radiateurs « normaux » (je n'ai rien changé à mes habitudes de chauffage cette année). De plus j'ai aussi découvert tardivement que je pouvais préchauffer mon eau chaude sanitaire un peu plus fort « gratuitement », l'économie est de 2 à 4 kWh/jour soit 1 l/jour de fioul (au moins vu ma chaudière) en plus, soit 100 l de mieux l'année prochaine.

Voici les éléments qui me paraissent être les atouts majeurs de mon installation.

- Le système d'eau chaude sanitaire surdimensionné est une très bonne chose : si on a la place, il ne faut pas hésiter.
- L'échangeur, fait en radiateurs de tôle, fonctionne très bien (ce n'est pas cher et facile à installer).
- Les deux stocks (eau chaude sanitaire/chauffage) permettent d'optimiser le rendement journalier en faisant fonctionner l'installation sur le stock le plus rentable.
- Je n'ai aucun regret concernant le drainback.

Les aspects les moins positifs de mon installation sont les suivants.

- Les deux stocks ont été relativement complexes à gérer au niveau de l'hydraulique et de l'automate. Ceci dit, une fois que c'est fait, cela devient transparent.
- En pratique, si le stock n'est pas à 40 °C au moins, le chauffage solaire à base de radiateurs n'est pas utilisé. Je pense faire trois murs chauffants cet été pour abaisser cette limite[10].
- Mon stock ne stratifie pas bien sans que je sache trop si cela vient de la canne d'eau chaude ou du rapport diamètre/hauteur. Ceci dit, je suis maintenant persuadé que ce n'est pas réellement important lorsque l'on a des stocks séparés.

Voici les éléments que j'ai appris et compris dans la littérature mais que j'avais ignorés ou négligés.

- Les capteurs solaires chauffent de l'eau. Ils n'apportent pas de l'eau à 50 °C mais chauffent de 30 °C une eau initialement à 20 °C, c'est à méditer…
- Les capteurs plans marchent même par mauvais temps (y compris la pluie !). Si votre eau froide l'est vraiment, le solaire est très intéressant pour vous.
- Le Millenium II est trop petit pour une installation comme la mienne (disons tout juste suffisant), préférez le Millenium III si vous avez plus de six sondes de mesure.
- L'installation de plomberie n'est pas si compliquée : il n'y a qu'à chauffer… J'ai finalement raté très peu de soudures. Il faut vous mettre à l'abri du vent, et utiliser une buse demi-ronde (qui entoure le tuyau) pour les gros diamètres.
- Soignez l'isolation thermique pour les tuyaux.
- Soignez l'isolation contre les parasites pour les sondes (câbles blindés, capacité de filtrage, etc.).
- Soyez sûr de l'endroit où les sondes de température sont placées. Il est primordial pour le rendement et la santé de l'installation que la valeur de la sonde reflète bien ce que l'on cherche à mesurer…
- Tickelman est difficile à respecter au pied de la lettre (trop cher en cuivre et raccords), il est pourtant indispensable que le débit soit le même dans tous les capteurs (en partie pour la raison exposée au paragraphe ci-dessus). Il faut découper le champ en groupes de capteurs pas trop nombreux (pas plus de trois ou quatre).

Aujourd'hui, 10 mars 2007, j'ai pompé un peu moins de 60 kWh ; j'aurais pu faire mieux mais j'ai modifié le programme de l'API, ce qui a suspendu le pompage pendant quelque temps... Le stock de chauffage est à 73 °C et le haut de l'eau chaude sanitaire à 50 °C (précision : l'API est en mode hiver !).

En résumé, il s'agit d'un chantier rentable, écologique dans ses objectifs, et passionnant !

10 Maintenant (mi-2008), c'est fait : le stock est utilisé jusqu'à 28 °C, l'économie annuelle de fioul est supérieure à 1 000 l.

Réalisation n° 5

par Emmanuel Marguet

- 30 m² de capteurs plans intégrés en toiture
- Ballon tampon de 1 200 l pour chauffage par plancher chauffant et eau chaude sanitaire instantanée
- Capteurs autovidangeables (drainback)
- Régulation par ordinateur portable (PC)





Notre maison est une ancienne ferme rénovée par nos soins de 20 m sur 15, soit 300 m² au sol. Actuellement, seul le premier étage est occupé en partie, ce qui représente 230 m² à chauffer. La restauration du deuxième étage dans un futur proche représentera un total de 450 m² à chauffer. Même si la maison est bien isolée, la consommation de fioul pouvait dépasser les 3 000 l par an, ce qui nous a poussés à trouver une autre solution de chauffage.

J'ai réfléchi au sujet au début des années 2000. Mais depuis la mise en place du crédit d'impôt, les devis pour une installation ont augmenté d'au moins 30 %... Et, même en soustrayant ces aides, il me restait plus de 16 000 € à payer pour un système complet eau chaude sanitaire et chauffage. Au prix actuel du fioul, et en estimant réduire la consommation de 50 %, il m'aurait fallu plus de 15 ans pour rentabiliser l'installation, les panneaux étant garantis seulement 5 ans.

En analysant ce que me proposaient les installateurs, je me suis dit que l'autoconstruction n'était pas si compliquée que ça.

Principe de l'installation

Pour une meilleure visibilité, le système complet est séparé en trois parties : circuit solaire, chauffage et eau chaude sanitaire. L'élément central commun aux trois schémas est une cuve de stockage de 1 200 l. Les différents capteurs de température sont indiqués par les lettres CT.

Quelques mots sur l'autoconstructeur

Âge : 34 ans.

Formation : ingénieur en électronique.

Profession : responsable du département développement radiofréquence (R & D), entreprise Schrader Electronics.

Intérêts particuliers : le bricolage en général, l'électronique, l'informatique, la lecture, le cinéma.

Domaine de réticence au départ : je n'avais jamais touché un chalumeau avant de commencer cette installation.

Circuit solaire

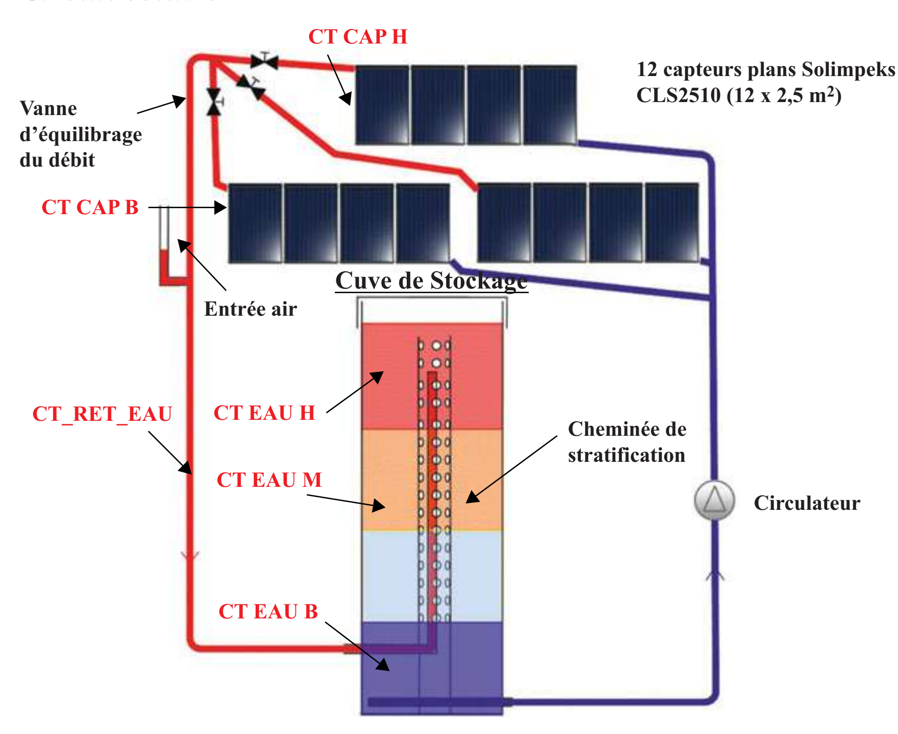


Figure 10.1
Le circuit solaire.



Figure 10.2
Représentation d'un panneau (pente de 2 cm/m).

Le principe est simple. Il s'agit d'un système avec autovidange ou drainback. Si la température à l'intérieur des panneaux solaires dépasse un certain seuil, le circulateur est enclenché. L'eau va alors remplir les capteurs et redescendre chaude dans la cuve. Dès que la température descend dans les panneaux, le circulateur est coupé, l'air entre dans le circuit et l'eau redescend par simple gravité, vidant les capteurs.

C'est l'un des systèmes les plus simples, et le plus économique. Il ne présente quasiment que des avantages :

- pas d'antigel ;
- pas d'échangeur solaire dans le ballon (donc meilleur transfert) ;
- pas de risque de gel (si le système est mis en place dans les règles de l'art) ;
- peu de risque de fuite car la pression est faible ;
- coût modéré.

Il ne faut toutefois pas négliger certaines précautions (voir encadré ci-dessous).

Précautions à respecter avec le système drainback

– Le système drainback peut requérir un circulateur de bonne performance ou deux circulateurs en série (cela dépend de la hauteur d'eau à monter).

– Il demande une attention particulière lors de la mise en place afin de garantir les pentes nécessaires à la vidange.

– Il nécessite un minimum de vitesse pour le circulateur afin de maintenir la hauteur d'eau.

Une sonde de température est placée à l'intérieur du huitième capteur dans la lignée basse, et une dans le quatrième capteur dans la lignée haute.

La mesure de température est réalisée dans toute l'installation par des circuits intégrés spécialisés DS18B20 de Dallas Maxim[1]. Ils fonctionnent jusqu'à 125 °C. Les panneaux étant posés avec un angle de 50°, leur température intérieure est plus élevée en partie haute qu'en leur milieu. J'ai donc placé les sondes à ce niveau. La température ne monte jamais au-delà de 125 °C si la circulation est activée, sinon il y a un risque de dépasser cette valeur avec destruction possible de la sonde. Je n'ai pas eu de problème pour l'instant, mais, dans les panneaux solaires, j'envisage de remplacer ces sondes par des PT1000.

1 Le site Internet de ce constructeur : www.maxim-ic.com.

En revanche, les circuits DS18B20 sont parfaits pour mesurer la température de l'eau dans la cuve, et le retour venant des capteurs. Un minimum de deux capteurs de température est nécessaire au fonctionnement : un dans les panneaux, et un dans la cuve. J'en ai rajouté d'autres, surtout par curiosité et parce qu'ils ne sont pas chers.

Les douze panneaux sont montés en trois groupes de quatre. La hauteur volumétrique à vaincre pour monter l'eau est d'environ 5 m. Je n'utilise qu'un seul circulateur de puissance moyenne.

Les conduites (en cuivre de 20/22 mm puis 16/18 mm) n'étant pas complètement en boucle de Tickelman (voir p. 38), les pertes de charge peuvent être légèrement différentes dans les trois circuits. Pour compenser ceci, des vannes manuelles ont été placées sur le retour de chaque groupe. Il est nécessaire de les ajuster une seule fois, à la mise en place. Lors d'une circulation stable, la température de l'eau sortant de chaque groupe est mesurée, et si l'une est plus basse que les autres, sa vanne est légèrement fermée pour freiner la circulation, ce qui va augmenter la température. En règle générale, un vrai montage en boucle de Tickelman est recommandé.

Circuit de chauffage

L'idée première était de renvoyer à la chaudière de l'eau à bonne température de manière à ce qu'elle ne démarre plus. Il s'est avéré un peu plus difficile que prévu de « deviner » la température de retour attendue. Après de nombreux essais, j'ai décidé de remplacer la régulation de la chaudière, de manière à contrôler non pas juste la partie solaire, mais le chauffage complet de la maison (hors radiateurs). La vanne CH_SOL est de type linéaire. Sa position est contrôlée par la régulation solaire. La vanne chaudière était présente sur l'installation de chauffage d'origine (chaudière au fioul), et elle est contrôlée par la régulation de la chaudière.

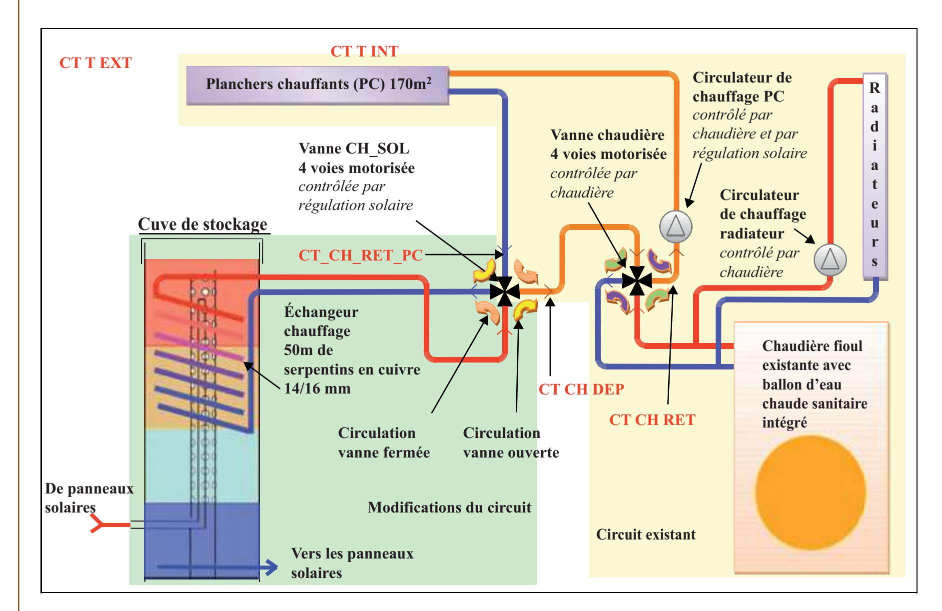


Figure 10.3
Le circuit de chauffage.

La seule modification matérielle du système existant a été d'implanter la vanne CH_SOL sur le retour des planchers chauffants (PC).

Le principe reste simple : le retour du PC est chauffé par un passage dans la cuve de stockage.

Nous constatons les trois modes de fonctionnement décrits ci-dessous.

- **La cuve est assez chaude, on est en chauffage solaire.** La chaudière est automatiquement mise en mode « Sans chauffage PC ». La vanne Chaudière est fermée, et la régulation solaire contrôle le circulateur de chauffage PC. La vanne CH_SOL est positionnée selon la température désirée en partance sur le PC.
- **La cuve n'est pas assez chaude pour du chauffage, mais est plus chaude que la température de retour du plancher chauffant.** On passe alors en mode « Préchauffage solaire ». La chaudière est mise en mode « Chauffage PC ». La vanne CH_SOL est ouverte complètement, et l'eau qui revient du plancher est « réchauffée » dans la cuve avant d'arriver à la chaudière. Ceci permet de gagner encore quelques degrés, et de vraiment récupérer au maximum toutes les calories accumulées dans la cuve.
- **La température de la cuve est plus basse que le retour plancher chauffant.** Il n'y a pas de solaire. La vanne CH_SOL est fermée, et la gestion est entièrement contrôlée par la chaudière.

Circuit de l'eau chaude sanitaire

L'eau froide venant du réseau passe dans tous les cas dans la cuve. La vanne quatre voies eau chaude sanitaire est de type TOR.

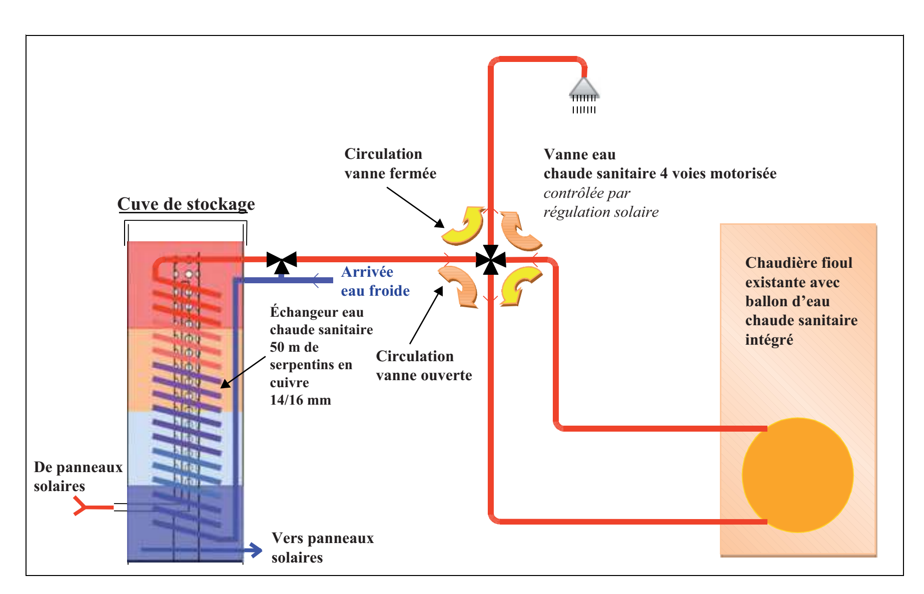


Figure 10.4
Le circuit de l'eau chaude sanitaire.

Pour le circuit de l'eau chaude sanitaire, nous observons deux modes de fonctionnement.

- **La température de l'eau au niveau supérieur de la cuve dépasse 40 °C, la vanne eau chaude sanitaire est ouverte et l'eau sortant des serpentins est assez chaude pour une utilisation directe en « temps réel ».** C'est uniquement le passage de l'eau dans la cuve qui permet de la chauffer, il n'y a aucun stockage. Le débit est un peu limité par la longueur et le diamètre des serpentins, mais il reste suffisant pour deux douches fonctionnant en même temps. En intersaison et en été, en présence de soleil, la cuve se réchauffe plus rapidement que ne la refroidit le passage de l'eau froide, nous avons donc de l'eau chaude tout le temps où le soleil est présent.
- **La température de l'eau de la cuve est inférieure à 39 °C, la vanne eau chaude sanitaire est fermée, l'eau est alors préchauffée dans la cuve avant d'arriver à la chaudière.** Même si le soleil n'est pas là pendant plusieurs jours, l'eau de la cuve ne descend pas en dessous de 15 à 20 °C, et donc préchauffe toujours un peu l'eau froide (< 10 °C).

Description des travaux

Nous allons maintenant montrer comment mettre en place ce circuit.

Capteurs

J'avais l'intention, comme beaucoup d'autres personnes du forum Apper au début, de fabriquer mes propres capteurs. Mais grâce au travail de Pierre Amet et de l'importateur Solaire Diffusion, je me suis finalement rendu compte que des capteurs fabriqués en Turquie ne revenaient pas plus chers, pour une meilleure qualité.

J'ai donc passé commande, et, fin juillet 2006, j'ai installé les douze capteurs de 2,5 m² chacun.

Les panneaux sont clairement étudiés pour être montés sur les tuiles. Le seul moyen de les fixer est d'utiliser l'encoche présente sur leur pourtour. Ils ne possèdent aucune structure permettant de les étanchéifier facilement.



Figure 10.5
Vue arrière du panneau. ⓐ *Encoche.* ⓑ *Arrière du panneau.*

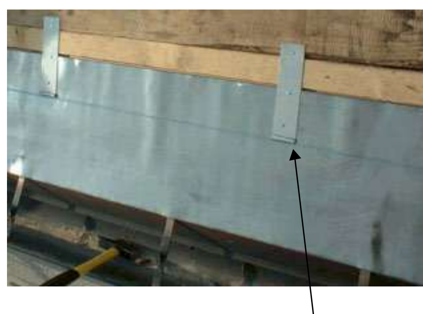
Habitant dans une région où la neige est abondante, je ne peux pas les poser sur les tuiles car ils risqueraient d'être arrachés lorsque la neige descend du toit. Et, en outre, je ne trouve pas cela très esthétique.

J'ai donc cherché le moyen de les intégrer à la place des tuiles. Des bandes de tôle inox et de plomb, ainsi que pas mal de silicone m'ont permis d'atteindre cet objectif. Des crochets inox ont été fabriqués pour fixer les capteurs.

La hauteur du toit dépassant 6 m, des échafaudages ont été nécessaires pour l'installation. J'ai enlevé les tuiles (figure 10.6), une ouverture avait été créée dans le toit pour amener directement les panneaux solaires depuis l'intérieur. Il a fallu ensuite installer des crochets de support (figure 10.7) et des bandes de plomb (figure 10.8).



Figure 10.6
L'emplacement des capteurs sur le toit.



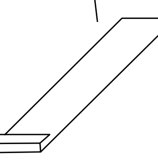


Figure 10.7
Les supports du bas des panneaux et les crochets.



Figure 10.8
Les supports et les bandes de plomb.



Figure 10.9
L'encoche des panneaux se glisse dans les crochets.

Pour la pose, on glisse l'encoche des panneaux dans les crochets (figure 10.9). Pour la connexion des panneaux, une tôle inox est insérée dans chaque encoche sur le côté des capteurs et un joint de silicone posé pour étanchéifier (figure 10.10). On referme avec une bande de plomb modelée qui recouvre le dessus de chaque panneau (figure 10.11).

Il faut ensuite connecter les arrivées et départs des panneaux (figures 10.12 et 10.13) : les sondes sont insérées dans les panneaux par un perçage réalisé au milieu de la hauteur. On rebouche ensuite le trou à l'aide de silicone (figure 10.14).

Les capteurs sont installés depuis bientôt deux ans, aucune fuite n'a été constatée. Ils suivent une descente d'environ 2 cm/m (qui est peu visible), afin de garantir la vidange. Le pan de toit est situé au sud (15° ouest). Son inclinaison, ainsi que celle des capteurs, est de 50°. Il n'y a aucune obscuration.



Figure 10.10
La tôle inox derrière les panneaux, les raccords bicônes.



Figure 10.11
La bande de plomb est repliée au-dessus de chaque panneau.





Figures 10.12 et 10.13
Une arrivée et un départ de panneau.



Figure 10.14
La sonde (a). Le trou a été rebouché avec de la silicone.



Figure 10.15
Vue d'ensemble : les panneaux sont installés.

Cuve de stockage

La cuve est une ancienne cuve d'eau utilisée auparavant pour abreuver les animaux dans les champs (figure 10.16). Galvanisée, elle a été choisie principalement pour sa forme parfaite (longue et étroite) afin d'obtenir une bonne stratification en position verticale. D'une longueur initiale de 3,10 m, elle a été coupée à 2,60 m, ce qui permet un volume maximal de 1 200 l.



Figure 10.16
La cuve d'origine.

La cuve a été ensuite entièrement résinée avec de l'époxy et de la fibre de verre. Ce n'est pas indispensable, mais c'est une précaution contre l'usure du temps (figure 10.17).



Figure 10.17
La cuve coupée et résinée.

L'entrée et la sortie du circuit solaire ont été placées en partie basse de la cuve. Ce n'était pas obligatoire, mais cela m'avait semblé plus logique à l'époque. Il fallait donc utiliser des passages brasés (figure 10.18).



Figure 10.18
Passage entrée/sortie brasé.



Figure 10.19
La cuve positionnée verticalement.



Figure 10.20
Utilisation d'un tonneau pour modeler le serpentin.

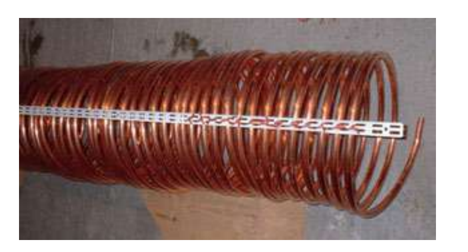


Figure 10.21
Les serpentins de l'eau chaude sanitaire sont maintenus en place par du fil électrique rigide.



Figure 10.22
Les deux serpentins réunis vont être placés à l'intérieur de la cuve.

Échangeurs

Deux échangeurs sont placés dans la cuve (figures 10.20 à 10.23). Chacun d'entre eux est constitué de 50 m de tube de cuivre recuit de 14/16 mm.

L'échangeur eau chaude sanitaire commence en bas de la cuve et finit au-dessus. Le diamètre des serpentins est d'environ 50 cm. L'échangeur du chauffage commence au milieu de la cuve et finit au-dessus. Son diamètre est d'environ 65 cm.

Le cuivre recuit est fourni en couronne, ce qui facilite la fabrication des serpentins. Je me suis aidé de deux tonneaux comme support pour donner le bon diamètre aux serpentins.



Figure 10.23
Les deux serpentins réunis dans la cuve.

Circulateurs

Je cherchais un circulateur de puissance moyenne. J'en ai acheté un d'occasion (état neuf) : l'opportunité s'est présentée pour un circulateur double (parallèle) Wilo TOP-SD30/5, mais ce n'était pas une volonté de départ.

Les deux circulateurs en parallèle augmentent le débit, mais en aucun cas la hauteur volumétrique. Ce modèle est assez puissant pour monter l'eau de 5 m sur mon installation. Si la hauteur était supérieure, un circulateur plus puissant serait nécessaire, ou l'ajout d'un deuxième, monté en série.

Le deuxième circulateur n'est pas nécessaire, je l'active uniquement s'il y a besoin d'augmenter le débit, comme lors de chaque démarrage, afin de diminuer le temps de remplissage des panneaux. Il est également activé en cas de retour de température très élevé (plus de 90 °C), ce qui n'arrive qu'en plein été et durant deux heures par jour au maximum. L'augmentation du débit laisse moins de temps à l'eau pour se chauffer dans les panneaux. La hauteur volumétrique réelle dépend des diamètres des tuyaux utilisés, et du nombre de capteurs.

Régulation

La régulation est basée sur un vieux PC portable (486) sous DOS et une carte d'interface sur le port parallèle. Les avantages de cette configuration sont les suivants :

- le système DOS monotâche permet des temporisations parfaites, ce qui est très utile pour contrôler les circuits DS18B20 (protocole OneWire) ;
- le coût réduit ;

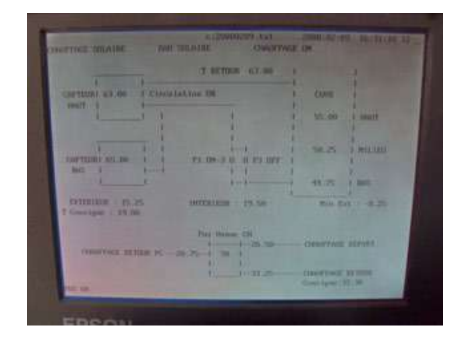


Figure 10.24
La régulation à l'écran.

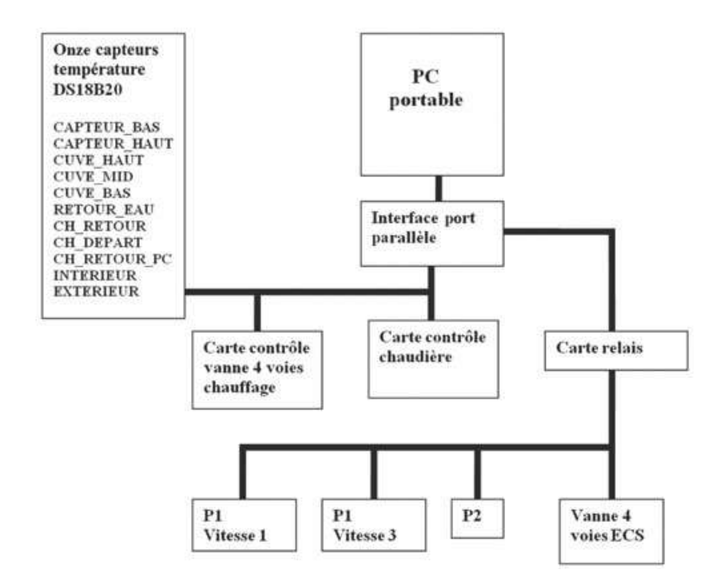


Figure 10.25
Le schéma électrique de l'installation.

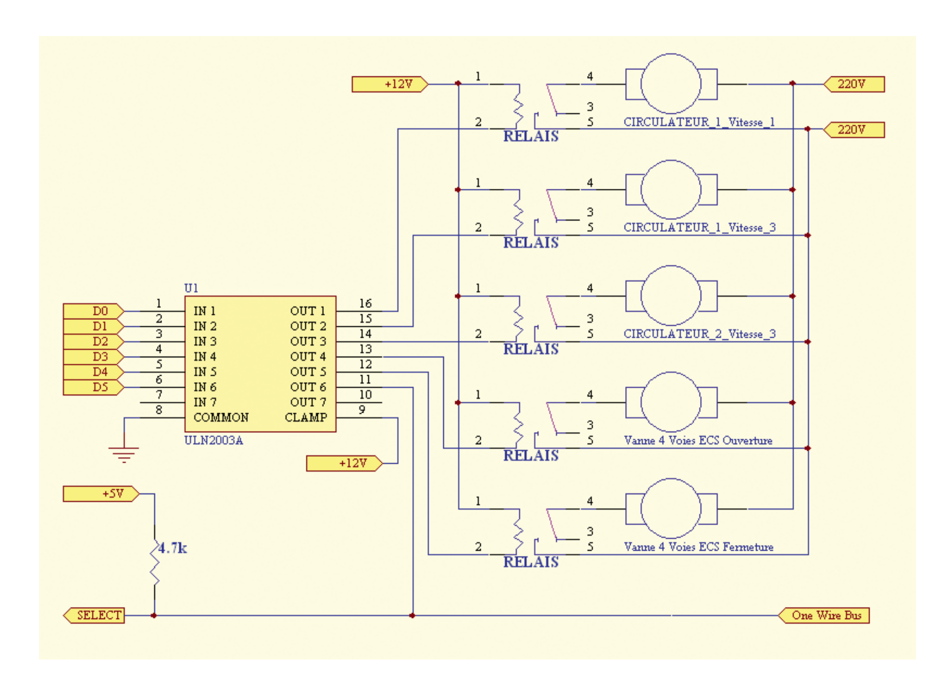


Figure 10.26
Le schéma électrique simplifié de l'interface sur le port parallèle.

- le programme C, avec compilateur intégré, permet de modifier et déboguer le programme en quelques secondes ;
- la bonne visualisation (à l'écran) ;
- la faible consommation (10 W pour le PC portable et l'électronique adjacente) ;
- la sauvegarde de toutes les données.

La régulation s'effectue avec onze sondes de température DS18B20. Une telle quantité n'est pas nécessaire ; mais comme une sonde DS18B20 coûte moins de 5 €, et que l'on peut en placer sans restriction de nombre, je me suis autorisé une certaine curiosité et ai mesuré la température en différents points stratégiques. Ces données m'ont permis d'améliorer le programme de contrôle au fil du temps.

Le PC portable a été récupéré. Un autre modèle serait tout à fait utilisable, mais s'il est plus récent, il consommera davantage.

Il n'est pas possible de connecter directement des relais sur le port parallèle du PC. Il faut utiliser un petit circuit d'interfaçage pour amplifier le courant de sortie. Ce circuit est également utilisé pour adapter le signal du bus OneWire.

Bilan et améliorations

Mesures de température

L'un des principaux avantages de l'utilisation d'un PC est la possibilité d'enregistrer toutes les données. Depuis le début, les températures ainsi que l'état des circulateurs sont enregistrés toutes les minutes.

Voici quelques graphiques de données réelles présentant les températures de quelques journées.

Le 15 septembre (figure 10.27), la température des capteurs atteint un niveau

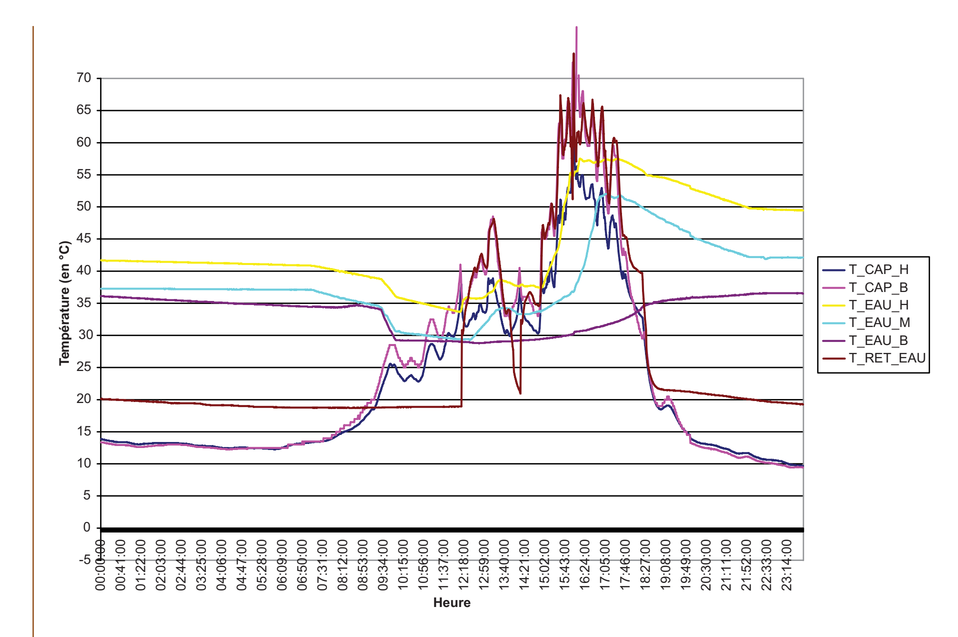


Figure 10.27
Températures relevées le 15 septembre 2006, peu de soleil, nuageux.

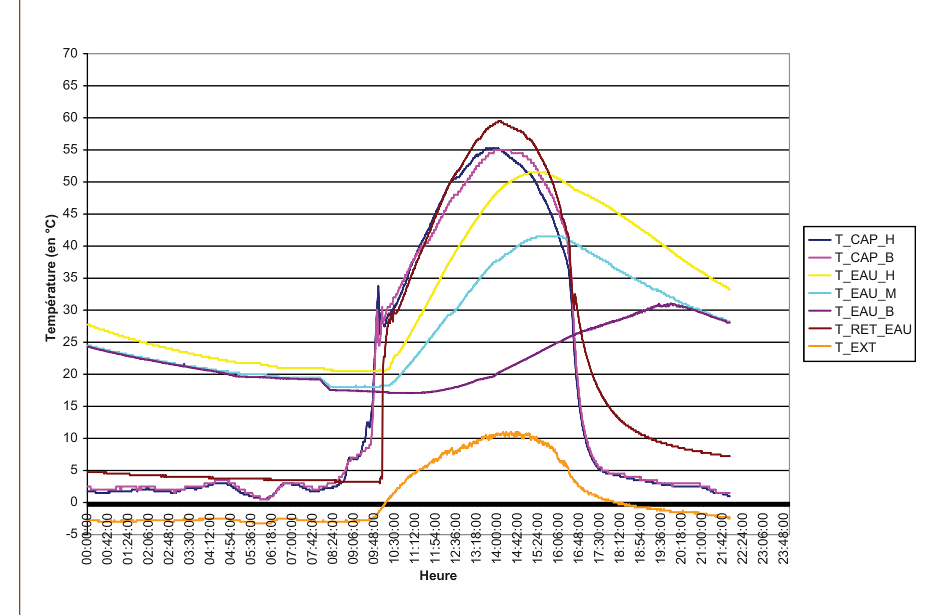


Figure 10.28
Températures relevées le 21 décembre 2006, journée la plus courte de l'année.

suffisant vers 12 h 15. La circulation est alors démarrée, et chauffe l'eau jusqu'à 14 h où un nuage l'arrête. Elle redémarre 30 min plus tard jusqu'à 17 h 40. La température des capteurs ne cesse de monter et descendre durant tout ce temps suivant le passage des nuages, mais elle reste toujours supérieure au seuil de déclenchement de la circulation.

Même le jour le plus court de l'année, le 21 décembre, et malgré une température extérieure ne dépassant pas 10 °C, on constate sur la figure 10.28 que la température de l'eau atteint presque 60 °C. La circulation fonctionne sans arrêt de 10 h à 16 h 30 ; il gèle toute la nuit, ce qui reste sans influence pour un système drainback car l'eau n'est plus présente dans les capteurs.

Bilan financier

Coûts

Consommation énergétique antérieure : 2 912 l de fioul (moyenne sur 3 ans).

Économie d'énergie réalisée : 1 183 l de fioul par an – moyenne sur 2 ans (soit environ 1 050 € à 0,62 €/l).

Coût de l'installation : 6 820 €.

Avec le recul, je peux conclure sans aucun doute que le solaire fonctionne, même en autoconstruction, puisque l'économie réalisée est en moyenne de 1 183 l de fioul par an.

Le coût total de l'installation a été inférieur à 7 000 €, somme qui est décomposée dans le tableau proposé ci-après. À ces chiffres s'ajoute la fierté d'avoir réalisé son propre système solaire : cela représente une grande valeur !

Répartition des coûts

Matériel	Coûts
Panneaux solaires Solimpeks Wunder CLS2510 (12 unités)	4 320 €
Fixations pour panneaux	250 €
Cuivre (tubes, couronnes, autres)	environ 1 500 €
Circulateur	100 €
Cuve	150 €
Vannes quatre voies motorisées (2 unités)	300 €
Divers	200 €
Total	**6 820 €**

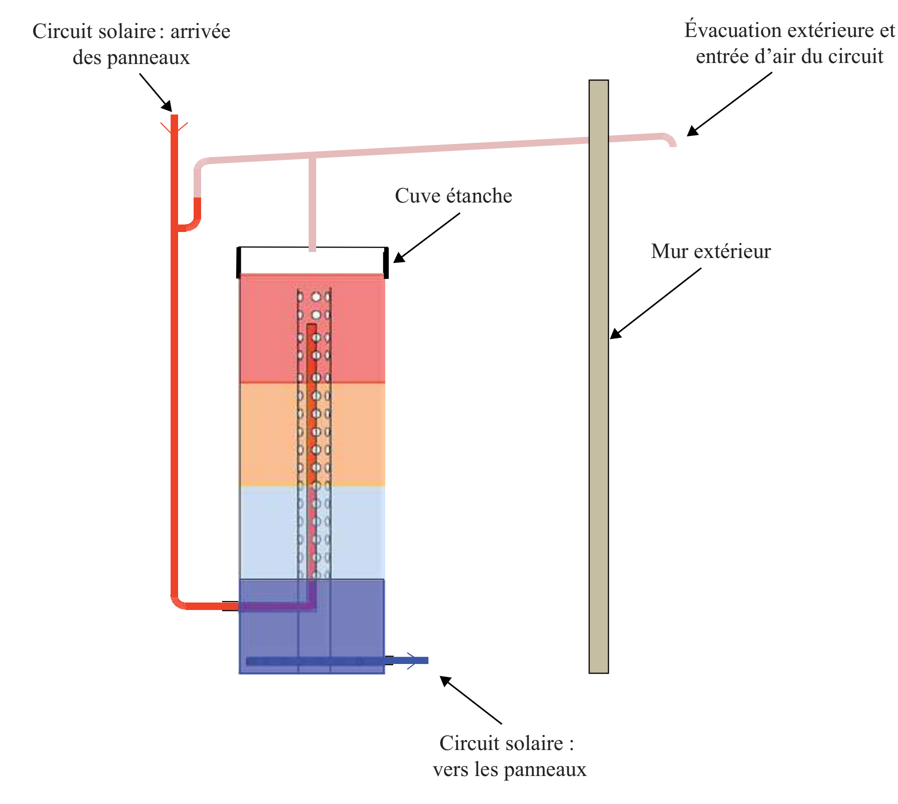


Figure 10.29
Évacuation de la vapeur.

Améliorations

Évaporation d'eau

Après presque deux années de fonctionnement, j'ai pu tester le principe de l'autovidange dans des conditions assez extrêmes. Il a fait chaud l'été, et froid en janvier (– 15 °C). J'ai pu constater que le froid n'était pas un problème, à condition bien entendu que la vidange se fasse bien.

Conseil

À la fin du montage, vérifier l'absence d'eau en dévissant le raccord bas du panneau le plus bas, environ 15 min après la coupure du circuit.

En revanche, l'un des points les plus négatifs concerne la cuve ouverte. Le principe même de l'autovidange rend impossible une fermeture complètement étanche de la cuve. Cela ne présente aucun problème si l'eau ne monte pas trop en température ; mais dès qu'elle dépasse environ 55 à 60 °C, l'évaporation commence, et un peu d'eau est perdue. Ce n'est pas dramatique, mais la vapeur sortant de la cuve peut provoquer des brûlures et transformer la pièce en sauna. La perte d'eau s'élève à environ 50 à 100 l par an.

L'une des idées venant du forum Apper était de mettre de l'huile dans la cuve d'eau. L'huile étant plus légère que l'eau, elle forme une couche en surface de l'eau qui devrait empêcher l'apparition de la vapeur. Malheureusement, je crois avoir essayé toutes les huiles existantes, et n'ai pas vu d'amélioration majeure.

La solution la plus évidente serait de réduire la température de retour en masquant plusieurs capteurs en été. Mais ce n'est pas facile à faire : il y a des risques à

vouloir atteindre les capteurs car ils sont à plus de 6 m de haut, sur une pente à 50°. De plus, si, par un jour bien ensoleillé, seuls quelques panneaux sont nécessaires, un lendemain nuageux requiert l'ensemble des capteurs. Une solution d'obscuration automatique serait envisageable, mais elle semble difficile à mettre en œuvre dans une région où la neige est abondante : en tombant du toit, la neige aurait de grandes chances d'entraîner le système.

J'ai opté pour une solution simple : évacuer la vapeur. J'ai rendu la cuve étanche, seule une sortie au niveau supérieur permet d'évacuer la vapeur vers l'extérieur. Ceci n'empêche pas la perte d'eau, mais c'est une solution satisfaisante au vu de la relativement faible quantité d'eau perdue.

Une variante de la solution que j'ai choisie serait de refroidir la vapeur. Le principe est le même, mais au lieu de rejeter la vapeur dehors, il s'agirait de la refroidir en la faisant passer par un échangeur placé dans un stock d'eau non isolée. Il devrait y avoir également une sortie extérieure au cas où le volume d'eau ne serait pas suffisant pour refroidir la vapeur.

Ce système permettrait de réduire la perte d'eau tout en gardant une entrée d'air et une cuve sans pression. Néanmoins, il nécessite de la place, et la réserve d'eau servant au refroidissement, de 200 l au minimum, doit impérativement se trouver plus haut que la cuve pour que l'air circule. Il faut donc faire attention de laisser une pente constante, de manière à empêcher la stagnation de la vapeur transformée en eau, ce qui bloquerait l'entrée d'air.

Régulation

Baser la régulation sur un PC a été extrêmement bénéfique pour mettre en place l'ensemble et déboguer le programme. Je pense à présent développer une carte dédiée, ce qui augmentera la fiabilité tout en réduisant la consommation. Le programme utilisé actuellement est disponible sur mon site[2].

Pour conclure

Le système fonctionne depuis maintenant presque deux ans. Les économies réalisées sont réelles, et supérieures à mes espérances.

Je continue toutefois à perfectionner l'installation, au niveau matériel comme pour la régulation. Je cherche également d'autres moyens pour réduire ma consommation de fioul, comme la mise en place d'un circuit eau sur un insert bois.

2 www.manumarguet.com.

Programmation d'un automate programmable industriel

L'utilisation d'un automate programmable industriel (API) est détaillée ici. Après un rappel des types d'informations utilisées par les régulations et des notions de logique, nous présenterons l'interfaçage d'une sonde PT1000, puis la programmation de la gestion d'un chauffe-eau solaire.

Rappel des notions de base

Nature des informations utilisées par les régulations

Les informations manipulées peuvent être de trois sortes : binaire (TOR), analogique ou numérique.

- **Binaire (TOR, tout ou rien) :** il s'agit d'un signal électrique à deux états, 0 ou 1, 0 ou 5 V selon la représentation. Un signal TOR est en général un signal électrique (interrupteur) ; un signal binaire est la représentation informatique (compréhensible par un automate ou un ordinateur) de ce signal TOR. Par exemple, la température est supérieure ou non à un seuil. Pour les signaux binaires, on parle aussi d'état logique (0 ou 1).
- **Analogique :** le signal est l'image électrique du phénomène physique mesuré. C'est une grandeur analogique qui varie continûment avec ce phénomène physique. Seules les régulations analogiques gèrent directement ce type de signal. Les autres types de régulations disposent d'un convertisseur analogique numérique (CAN) intégré, qui fournit à partir du signal analogique une donnée numérique manipulable par la logique interne ou le logiciel de l'automate[1].
- **Numérique :** un signal numérique est la représentation informatique (compréhensible par un automate ou un ordinateur) d'un signal analogique. C'est un signal formé d'une combinaison d'états logiques binaires transformant la grandeur analogique en un nombre entier généralement compris entre 0 et 255 (8 bits) ou entre 0 et 1023 (10 bits) dans les automates qui nous préoccupent.

La figure 1 présente un exemple d'évolution d'une température durant une journée. On y lit trois types de courbes.

- Courbe verte (signal analogique) : signal analogique (tension variant de 0 à 4,8 V), reflet d'une température variant de 0 à 77 °C.
- Courbe rouge (signal binaire) : un comparateur confronte le signal analogique, reflet de la température, à un seuil (47 °C dans cet exemple). Le signal en sortie offre deux possibilités uniquement : 0 logique (0 V) lorsque la température est inférieure ou égale au seuil, et 1 logique (5 V) si elle est supérieure.
- Courbe bleue (signal numérique) : le signal analogique, reflet de la température, est numérisé via un convertisseur AN. Nous avons choisi un CAN 3 bits, fournissant seulement les nombres de 0 à 7 (2^3, soit 8 possibilités). Il est réglé pour donner la valeur 0 lorsque la température est inférieure à 10 °C. Il donne toutes les valeurs entières de 0 à 7 lorsque la température varie de 0 à 70 °C (au-delà, il reste bloqué à 7).

Le synoptique de traitement est présenté dans la figure 2.

Cet exemple souligne l'importance du pas d'échantillonnage, qui est la plus petite valeur analogique provoquant un changement de la valeur numérique. Ici, le pas d'échantillonnage est de 10 °C. Une température comprise entre 20 et 29 °C sera représentée par une seule et même valeur numérique : 2. On voit alors l'intérêt de disposer d'un CAN qui propose la résolution la plus importante possible. Pour une sonde de 0 à 100 °C, un convertisseur 8 bits aura un pas d'échantillonnage de 0,4 °C ($100 / 2^8 = 100 / 256$), alors qu'un CAN 10 bits aura un pas de 0,1 °C ($100 / 2^{10} = 100 / 1024$).

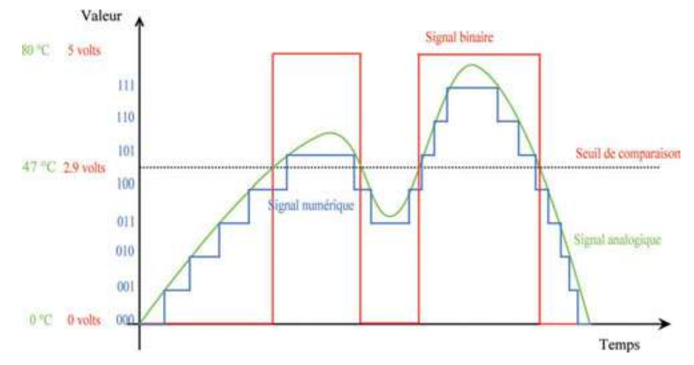


Figure 1
Types de signaux.

1 Évidemment, il existe également des convertisseurs numériques analogiques (CNA).

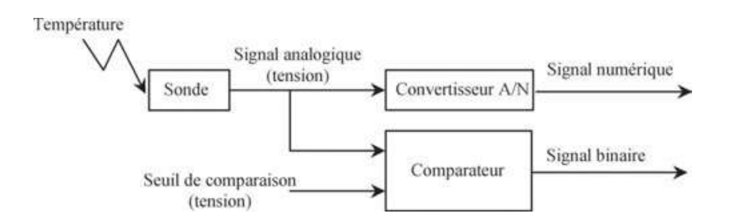


Figure 2
Blocs signaux.

Éléments de logique combinatoire

La logique combinatoire associe l'état de la sortie d'une porte logique aux états de ses entrées, quels que soient les états antérieurs de ses entrées/sorties. Par exemple, la fonction OU : la pompe de circulation du circuit primaire de l'installation solaire est mise en fonction si la température du capteur est supérieure à la température du ballon OU si la température du capteur est supérieure à 90 °C.

On représente les différents états des entrées/sorties des portes logiques à l'aide des tableaux de Karnaugh, proposés ci-dessous[2]. Ces fonctions élémentaires sont représentées par deux symboles, l'un correspondant à la norme française, l'autre à la norme internationale. Les automates programmables industriels fournissent ces fonctions élémentaires.

- **OU (OR)** : fonction multi-entrée dont la sortie est à 1 lorsqu'au moins une des entrées est à 1, et à 0 lorsque toutes les entrées sont à 0. Elle est représentée par le caractère « **+** ».

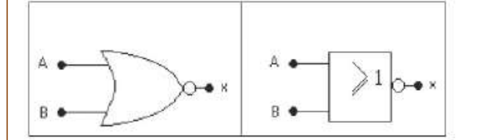


Figure 3
Symboles porte OU (symbole international à gauche, français à droite).

2 Pour plus d'information sur les tableaux de Karnaugh et l'algèbre de Boole, voir la page Internet http://www.physique.ens-cachan.fr/pagregp/enseignement/elec/electronique/numerique.pdf.

Entrée A	Entrée B	Sortie = A + B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

- **ET (AND)** : fonction multi-entrée dont la sortie est à 1 lorsque toutes les entrées sont à 1. Dans tous les autres cas, la sortie est à 0. Elle est représentée par le caractère « . ».

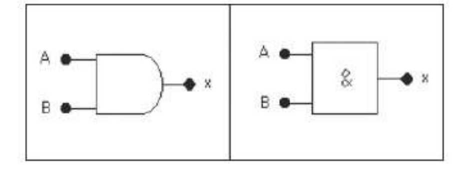


Figure 4
Symboles porte ET (symbole international à gauche, français à droite).

Entrée A	Entrée B	Sortie = A . B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

- **NON (NOT)** : fonction à une entrée dont la valeur de sortie est l'inverse de l'entrée. Une entrée à 1 donne une sortie à 0, et inversement. Elle est représentée par le caractère « – » ou « **/** ».

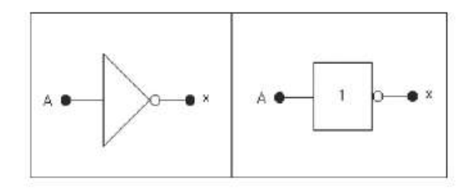


Figure 5
Symboles porte NON (symbole international à gauche, français à droite).

Entrée A	Sortie = /A
0	1
1	0

- **COMPARATEUR** : il effectue une comparaison entre deux valeurs numériques. La comparaison peut être effectuée par infériorité, égalité ou supériorité. C'est, par exemple, comparer une donnée numérique (un seuil déterminé, une température de référence) à une température issue d'une des entrées de l'automate.

Théorèmes de Morgan

Ils permettent la décomposition d'une expression complexe.

– Premier théorème : /(a + b) = /a ./b

L'inverse de a OU b est égal à l'inverse de a ET l'inverse de b.

– Deuxième théorème : /(a . b) = /a + /b

L'inverse de a ET b est égal à l'inverse de A OU l'inverse de b.

Utilisation d'une sonde PT1000 avec un automate programmable individuel

Montage d'une sonde PT ou QTY

Composants

Un tube en cuivre ou en aluminium, la sonde, une gaine thermorétractable, 20 cm de câble haute température (type halogène), de la graisse thermique Compound (pour améliorer la dissipation thermique des transistors), et de la silicone haute température composent ce montage. Le prix approximatif dépasse légèrement celui de la PT100 ou 1000, soit environ 6 € au total.

Montage

Écrasez et soudez une des extrémités du tube. Sur chaque brin du câble, insérez la gaine thermorétractable, soudez la patte de la sonde à l'extrémité du brin du câble, ramenez la gaine sur les points de soudure et chauffez-la avec un briquet pour qu'elle se rétracte.

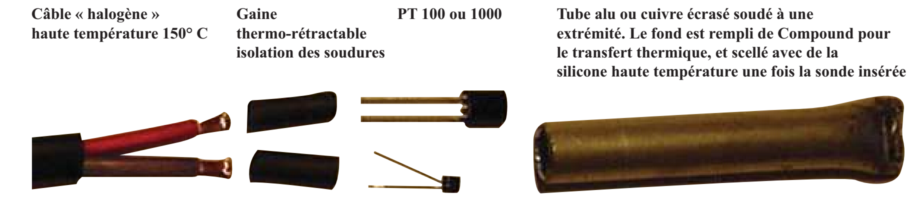


Figure 6
Éléments constitutifs d'une sonde.

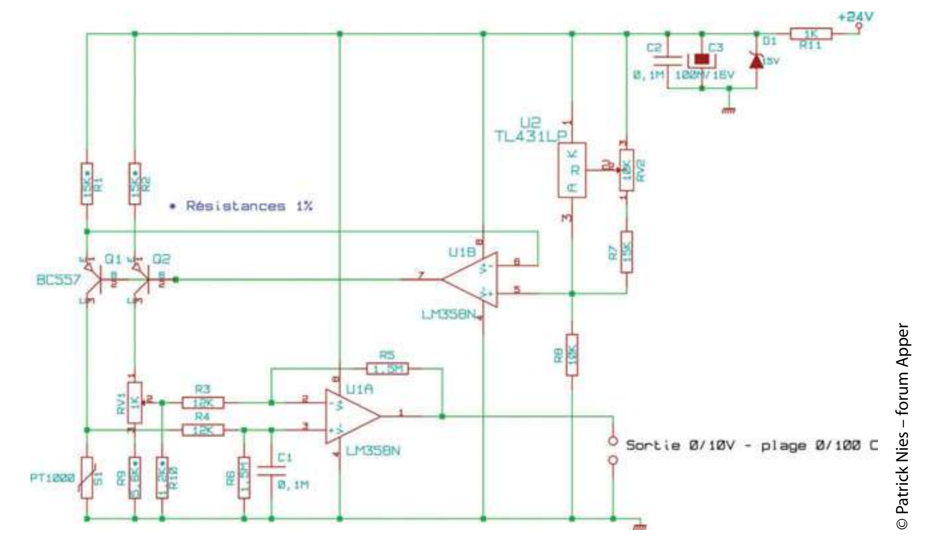


Figure 7
Carte interface sonde/automate.

Remplissez, à l'aide d'un pinceau ou autre, le fond du tube avec le Compound (couche de 3 mm). Introduisez l'ensemble sonde + câble dans le tube, et scellez l'entrée libre avec la silicone.

Carte d'interfaçage pour sonde PT ou QTY

Le montage est différentiel, ce qui signifie qu'il peut être utilisé d'une part pour mesurer une température (avec une sonde), d'autre part pour mesurer une différence de température (avec deux sondes) et donc mesurer éventuellement l'énergie produite par l'installation.

Ce montage présente de nombreux avantages. Simple – il nécessite un minimum de composants –, il peut s'intégrer dans un boîtier électrique proche de la sonde (ce qui permet une insensibilité du montage aux parasites électriques). La consommation électrique est très faible (quelques milliampères) et l'alimentation unipolaire (de 15 à 30 V) peut provenir de l'alimentation 24 V d'un Millenium. La calibration des températures minimale et maximale est effectuée par un jeu de résistances 1 %.

Un dossier de fabrication complet (description du schéma, implantation des composants, typon et procédures de calibration) est disponible sur le site Internet de l'Apper.

Utilisation d'un automate industriel programmable

Introduction aux Millenium II et III

Le support de travail est le Millenium II ou III proposé par la société Crouzet.

Avec les outils logiciels, totalement graphiques, on peut concevoir d'une manière simple les fonctions de transfert reliant entrées et sorties. Trois modes de fonctionnement permettent la conception, la mise au point et la surveillance de l'installation.

Les trois modes de fonctionnement

▶ Édition

Dans ce mode, on « dessine » le programme à l'aide d'une bibliothèque de fonctions que l'on peut paramétrer et relier entre elles afin d'obtenir le résultat recherché. Les fonctions sont classées par type. On choisit une fonction dans un groupe, puis on l'installe sur la feuille de travail. Chaque cellule possède ses propres paramètres statiques de fonctionnement. Les entrées/sorties des fonctions sont reliées par des fils (tout comme dans un montage réel) ou symbolisées par des noms (labels, étiquettes). On conçoit ainsi l'application.

▶ Simulation

Ce mode permet la mise au point du programme. Le fonctionnement de l'automate est simulé sur le PC. Chaque donnée, entrée, donnée numérique ou paramètre de fonction peut être modifiée par le concepteur afin de tester les différents cas de figure. On teste donc l'application sur le PC.

▶ Monitoring

Il s'agit du mode opérationnel. Le programme est chargé dans l'API où il est exécuté. Le concepteur peut vérifier le bon fonctionnement de l'automate par une recopie des différentes valeurs calculées par l'API sur le PC.

Quelques fonctions importantes spécifiques

NUM : permet de fixer une valeur numérique statique (déterminée lors de la phase de développement en mode Édition ou Simulation), une température de consigne par exemple.

GAIN : permet d'appliquer un gain et un offset (addition d'une constante) à une entrée numérique. Sortie = (a × entrée) + c. Les principales utilisations de cette fonction sont la transformation en degrés Celsius des valeurs issues des convertisseurs AN (qui varient entre 0 et 255), et l'ajout d'une constante à une donnée numérique (sortie = entrée + constante). Par exemple : soit une sonde délivrant 0 à 10 V pour une température variant de – 10 à 100 °C. À – 10 °C, le convertisseur donne 0, et à 100 °C le convertisseur donne 255. Pour transformer la donnée de sortie du convertisseur en degrés Celsius, il faut effectuer l'opération suivante : sortie = [convertisseur × (100 – (– 10)) / 255] – 10 = (convertisseur × 110 / 255) – 10.

DISPLAY : permet d'afficher une information sur l'afficheur de l'automate (4 lignes de 12 caractères), par exemple les températures des sondes et l'état des sorties binaires.

TIMERS : les temporisateurs offrent une multiplicité de fonctionnalités :

- TIMER A/C. C'est un retard de signal : la sortie copie l'entrée avec un certain retard.
- TIMER B/H. À partir d'un front montant sur l'entrée, la sortie passe à l'état 1 pendant le laps de temps t. C'est une fonction pratique, notamment pour assurer la commutation d'une vanne multivoie ne comportant pas de contact de fin de course.
- TIMER PROG. Cette fonction permet de générer un signal cyclique suivant un horaire déterminé (horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel ou daté). On peut donc effectuer une opération périodiquement suivant un calendrier spécifié.

BOOLEAN : opérateur logique à quatre entrées, permet de déterminer l'état de sa sortie selon l'état de ses entrées grâce à un tableau descriptif.

MUX : laisse la possibilité de choisir parmi plusieurs données numériques présentes sur ses entrées laquelle sera disponible sur sa sortie.

CAM : copie logique très sophistiquée d'un arbre à cames.

Application à un chauffe-eau solaire différentiel

Un chauffe-eau solaire différentiel est un chauffe-eau solaire dont la pompe de circulation du fluide du circuit primaire est mise en fonction ou non en fonction de la différence de température entre les capteurs solaires et le stock.

Nous allons donc suivre le principe de fonctionnement du chauffe-eau solaire différentiel (autonome) suivant : la pompe du circuit primaire est mise en fonction lorsque la température du capteur dépasse la température du ballon d'au moins 10 °C ; elle est arrêtée dans le cas inverse.

Cela se traduit physiquement sur l'API de la manière suivante :

- deux entrées, la sonde du ballon (variant de 0 à 60 °C) sur l'entrée I5, et la sonde du capteur (allant de – 10 à 100 °C) sur l'entrée I6. Ces sondes délivrent une tension variable de 0 à 10 V ;
- la sortie O2 est orientée sur la pompe du circuit primaire ;
- un affichage en degrés Celsius des températures du ballon et du capteur.

L'équation de fonctionnement est :

O2 = temp. capteur > (temp. ballon + 10 °C).

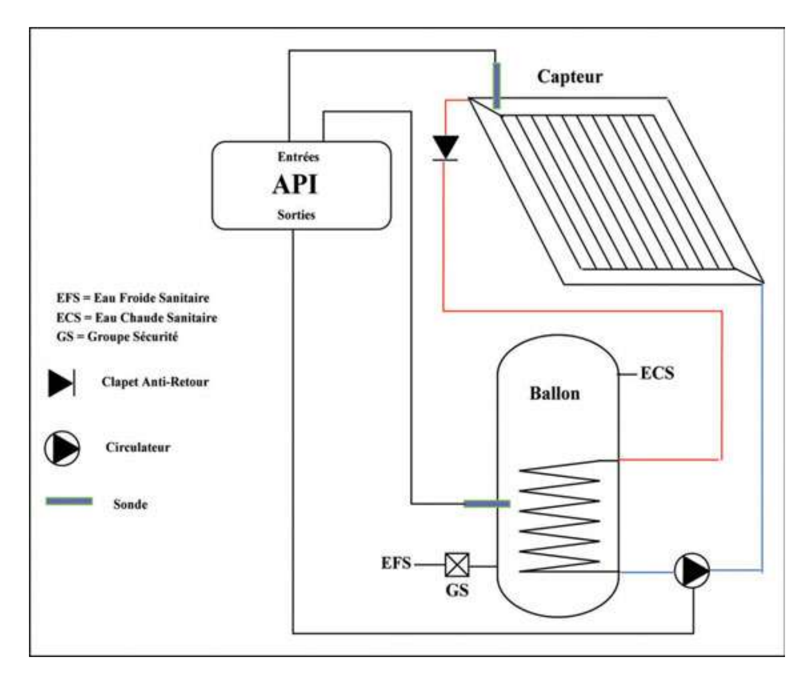


Figure 8
Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire différentiel.

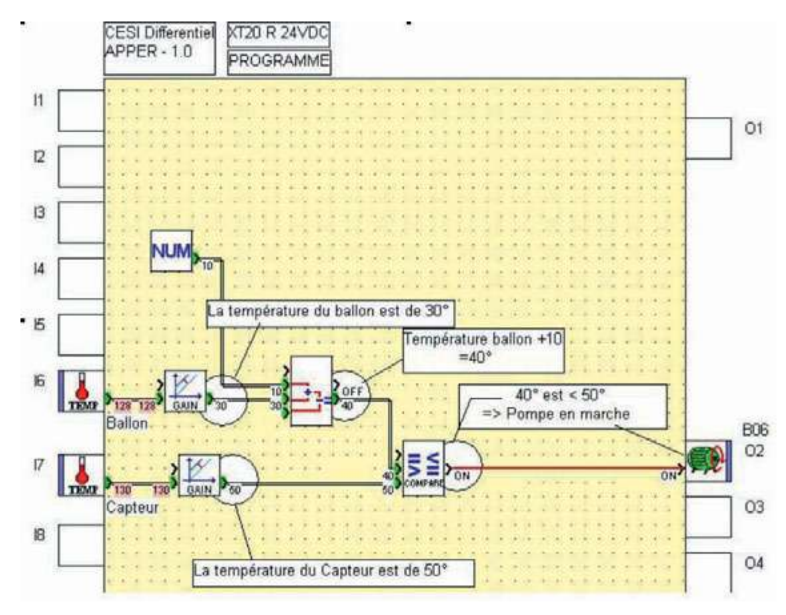


Figure 9
Feuille de travail proposée par le Millenium II. La température capteur autorise le fonctionnement de la pompe.

La figure 9 représente la feuille de travail proposée par le Millenium II en mode simulation – cette feuille se lit de gauche à droite. À gauche de la feuille sont regroupées les entrées de l'API. Ici, seules deux de ces entrées sont utilisées : les convertisseurs AN permettant de lire les températures du ballon et du capteur. À droite, sont réunies les sorties de l'API. Une seule est utilisée pour commander la pompe.

Le programme se lit de la manière suivante. Côté capteur, la sortie du convertisseur vaut 130. La fonction GAIN transforme cette valeur en une donnée exprimant la température du capteur en degrés Celsius : 50 °C. Côté ballon, la sortie du convertisseur vaut 128, ce qui équivaut à 30 °C en sortie de la fonction GAIN de cette voie. À cette valeur de 30 °C, on ajoute une constante définie par la fonction NUM. Cette constante vaut 10. En sortie de l'ADDITIONNEUR, la température vaut 40 °C. La valeur de cette sortie est comparée (fonction COMPARE) à la température du capteur. Comme 50 °C est supérieur à 40 °C, la sortie de la fonction COMPARE est ON (signal binaire). Cette sortie est directement reliée à la pompe, qui est donc en fonction.

Un second schéma illustre ce qu'il se passe si la température du capteur baisse (figure 10). Rien n'a changé côté ballon. Côté capteur, la sortie du convertisseur AN ne vaut plus ici que 90, ce qui correspond selon le calcul de la fonction GAIN à 32 °C. Cette valeur étant inférieure à 40 °C, la sortie de la fonction COMPARE est OFF, et la pompe arrêtée.

Cet exemple souligne la simplicité de lecture des programmes du Millenium II. Ce logiciel n'est pas seulement simple à lire, il est simple de conception (voir ci-après).

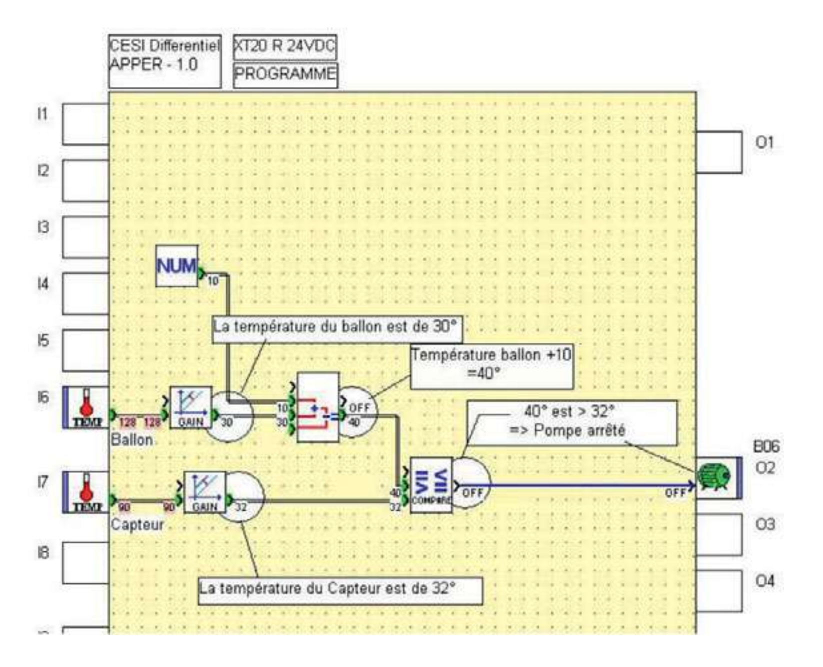


Figure 10
Feuille de travail proposée par le Millenium II. La température capteur n'autorise pas le fonctionnement de la pompe.

Démarrez un nouveau projet par le menu Fichier/Nouveau. Spécifiez alors le type de l'automate et les éventuelles extensions dont vous disposez. Puis une feuille de travail vierge s'affiche (figure 12) avec, à gauche, les plots d'entrée (Ix), à droite, les plots de sortie (Ox), et une nouvelle barre : la barre de fonctions.

Suivant le modèle d'automate utilisé, vous disposez de plus ou moins d'entrées et de sorties dont les fonctions sont prédéterminées. Le XT20 dispose de 4 entrées TOR (I1 à I4 afin de gérer des signaux binaires extérieurs), de 8 entrées TOR ou analogiques (I5 à I12 pour recevoir les températures de sonde par exemple), et de 8 sorties équipées de relais permettant la commande directe des pompes et des vannes.

Comme nous l'avons vu, trois modes de fonctionnement sont accessibles. Le mode de départ est le mode Édition.

Didacticiel du Millenium

Ce chapitre est un didacticiel présentant l'utilisation du logiciel du Millenium au travers de cette application basique.

Développement du programme (mode Édition)

Lancez le logiciel (figure 11).



Figure 11
Affichage des menus au lancement du logiciel.

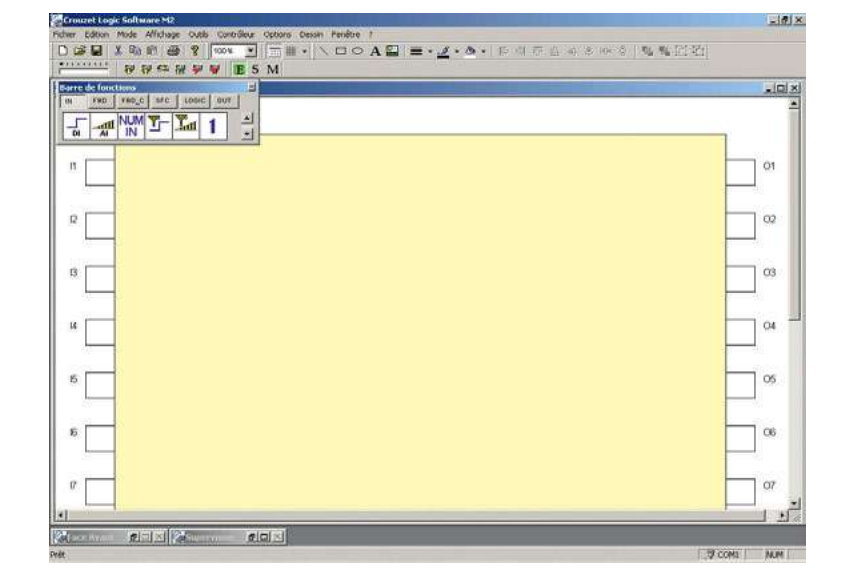


Figure 12
Feuille de travail vierge.

Présentation générale du mode Édition

Ce mode entièrement graphique permet la construction de l'application. On dépose sur la feuille de travail les fonctions désirées, puis on relie leurs entrées et leurs sorties par un réseau filaire. Le résultat est comparable à une carte électronique sur laquelle on place des composants (les fonctions) reliés par les pistes du circuit imprimé (le réseau filaire). Chaque fonction possède ses propres paramètres de fonctionnement.

Implémentation d'une fonction sur la feuille de travail : se fait à partir de la barre de fonctions, qui comporte deux lignes de symboles (figure 13). La première correspond aux groupes de fonctions (IN, FBD, FBD_C, SFC, LOGIC et OUT), la seconde présente les différentes fonctions du groupe sélectionné.

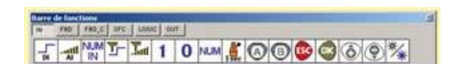


Figure 13
Barre de fonctions.

Cliquez sur l'icône de la fonction désirée, puis, en maintenant enfoncé le bouton de la souris, déplacez le curseur pour amener l'icône sur la feuille de travail. La fonction est implémentée.

Paramétrage d'une fonction : double-cliquez sur une fonction implémentée sur la feuille et fixez les paramètres.

Câblage des fonctions : les entrées/sorties des fonctions implémentées sont indiquées par le signe « > », et soulignées par un fond vert lorsque l'entrée/sortie gère une donnée numérique (figure 14). Pour relier deux fonctions, cliquez sur une entrée/sortie d'une des deux fonctions puis, en maintenant le bouton de la souris enfoncé, déplacez le curseur jusqu'à l'entrée/sortie de l'autre fonction afin de former la liaison désirée. Le type du signal véhiculé par la liaison est homogène (une entrée binaire ne peut exploiter une donnée numérique par exemple).

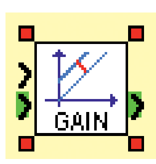


Figure 14
Exemple de fonction : GAIN.

Supprimer une fonction

Lorsqu'une fonction est implémentée et câblée, on peut à tout moment la supprimer en cliquant dessus et en appuyant sur la touche Suppr. Ceci a aussi pour effet de supprimer toutes les liaisons qu'elle avait avec d'autres fonctions implémentées.

Aide en ligne : une aide générale est accessible par la touche F1. Une description précise de chaque fonction est accessible dans sa fenêtre de paramétrage via le bouton d'aide.

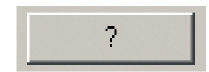


Figure 15
Le bouton d'aide.

Câblage des entrées

Suivant les caractéristiques de l'automate, les entrées/sorties permettent ou non de gérer différents types de signaux (entrée TOR, entrée analogique, sortie avec relais normalement ouvert ou fermé, etc.). Il faut donc spécifier la nature du signal appliqué aux entrées et aux sorties en implémentant sur les plots des fonctions issues des groupes IN et OUT.

Sélectionnez dans la barre de fonctions le groupe IN (figure 16).

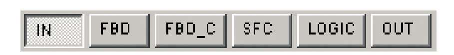


Figure 16
Sélection du groupe IN

Sélectionnez la fonction AI en cliquant sur son icône puis, tout en maintenant le bouton souris enfoncé, faites glisser le curseur afin d'amener cette fonction sur le plot d'entrée I5.



Figure 17
Sélection de la fonction AI.

On a ainsi implémenté le plot d'entrée I5 (figure 18).

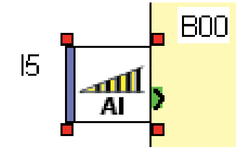


Figure 18
Plot I5 implémenté.

Chaque fonction implémentée est repérée par un numéro de bloc automatiquement incrémenté (B00, B01, etc.).

Afin de ne pas confondre les deux voies de traitement (température du ballon et température du capteur), double-cliquez sur la fonction AI implémentée et, dans l'onglet Commentaires, entrez dans la zone Commentaire le texte « Ballon » et cochez l'option Afficher le commentaire.

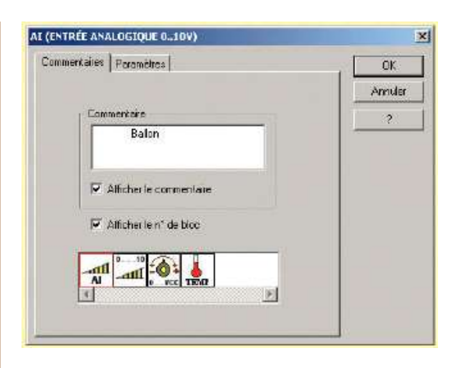


Figure 19
Fenêtre de paramétrage de la fonction d'entrée AI.

Répétez l'opération afin d'implémenter une autre fonction AI sur le plot I6 avec le commentaire « Capteur ». On a ainsi défini les plots d'entrée I5 et I6 (figure 20).

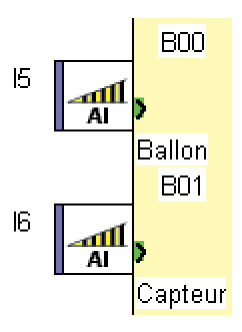


Figure 20
Les plots I5 et I6.

▶ Le câblage des sorties

Cliquez sur le bouton OUT de la barre de fonctions et implémentez une fonction DO sur le plot de sortie O2 (figures 21 et 22).

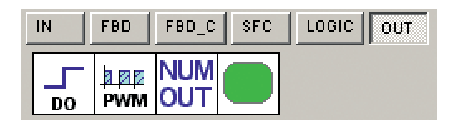


Figure 21
Sélection de la fonction de sortie DO.

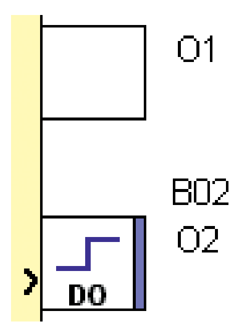


Figure 22
Apparence de la sortie O2.

▶ Les sondes de température

Les sondes de température utilisées ici délivrent une tension variant de 0 V (température minimale de sa gamme de température, à – 10 °C par exemple) à 10 V (température maximale de sa gamme, à 100 °C par exemple). Cette tension analogique appliquée à une des entrées du Millenium II est convertie par celui-ci en donnée numérique sur 8 bits (de 0 à 255), disponible en sortie de fonction AI.

La donnée numérique AI est fonction de la température et de la différence entre les températures minimale et maximale, ce qui n'est pas très pratique à manipuler. Pour disposer d'une température exprimée en degrés, il faut utiliser une fonction GAIN dont l'entrée est connectée à la sortie de la fonction AI.

▶ Les cellules GAIN

Sa forme générale est : Sortie = [(A/B) × Entrée] + C, avec dans l'application donnée A = température maximale – température minimale, B = 256[3] et C = température minimale.

Implémentez une fonction GAIN (groupe FBD) en face de l'entrée I5 (figure 23).

Double-cliquez dessus et renseignez ses paramètres : A = 60, B = 256 et C = 0 (figure 24).

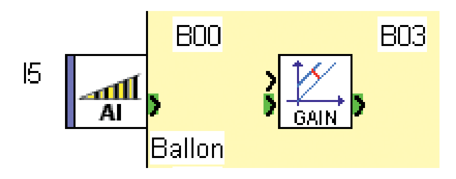


Figure 23
Fonction GAIN en face de I5.

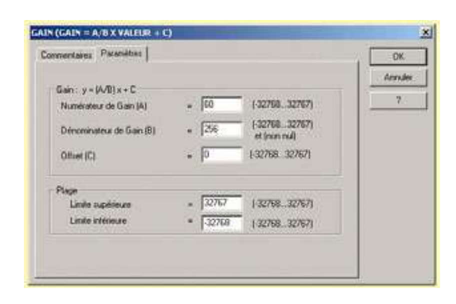


Figure 24
Fenêtre de paramétrage de la fonction GAIN.

Reliez son entrée ENTRÉE CALCUL à la sortie de la fonction AI du plot I5 (B00). Pour cela, placez le curseur de la souris sur la sortie de la fonction AI. L'apparence du curseur change, passant d'une flèche à une croix. Cliquez sur cette sortie et, tout en maintenant le bouton de la souris enfoncé, déplacez le curseur jusqu'à l'entrée de la fonction GAIN.

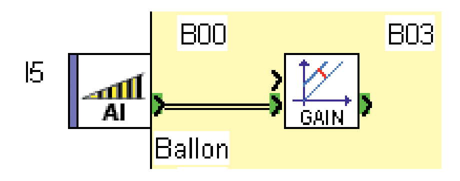


Figure 25
Ensemble entrée I5 et cellule GAIN.

Implémentez une autre fonction GAIN en face de l'entrée I6, paramétrez-la (A = 120, B = 256 et C = – 10), et reliez son entrée à la sortie de la fonction DI du plot I6 (B01) (figure 26).

3 Le CAN donne des valeurs de 0 à 255 mais le système traite des valeurs 8 bits variant de 1 à 256.

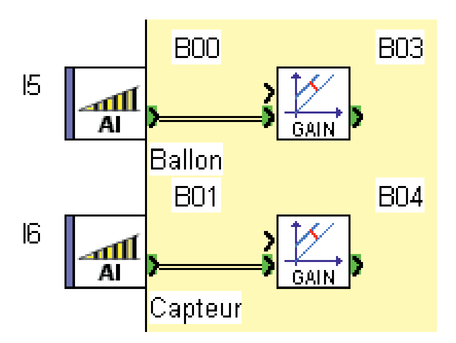


Figure 26
Apparence des deux entrées et des deux cellules GAIN.

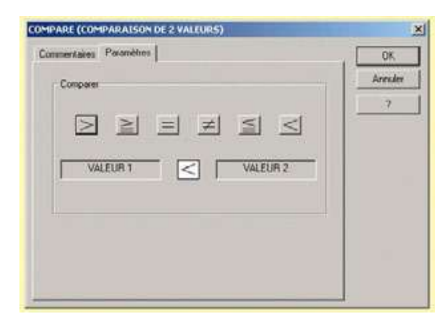


Figure 27
Fenêtre de paramétrage de la fonction COMPARE.

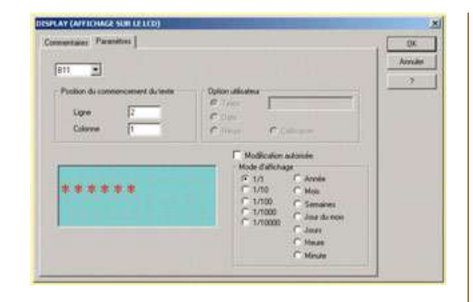


Figure 29
Fenêtre de paramétrage de la fonction DISPLAY.

▶ Calcul de la température du ballon + 10

Deux solutions sont possibles.

- Utiliser une fonction GAIN de paramètres A = 1, B = 1 et C = 10.
- Utiliser une fonction NUM et un additionneur.

Dans ce second cas, implémentez une fonction NUM (groupe IN). Double-cliquez dessus et initialisez le paramètre Valeur de la constante à 10. Implémentez ensuite une fonction ADD/SUB (groupe FBD_C). Reliez son entrée ENTRÉE 1 à la sortie de la fonction NUM (B05) et son entrée ENTRÉE 2 à la sortie de la fonction GAIN (B03, température du ballon).

▶ Fonction COMPARE

Pour effectuer une comparaison de la température du capteur et de la température du ballon + 10, et commander la pompe, il faut implémenter une fonction COMPARE (groupe FBD) dont l'entrée VALEUR 1 est connectée à la sortie SORTIE CALCUL de la fonction ADD/SUB (B06), et l'entrée VALEUR 2 à la sortie de la fonction GAIN (B04, température capteur). Paramétrez-la avec le symbole « < » (figure 27).

Reliez la sortie de cette fonction à l'entrée de la fonction DO (B02) implémentée sur la sortie O2.

On a ainsi les deux entrées I5 et I6 qui, par le jeu de différentes fonctions programmées, aboutissent à la sortie O2 (figure 28).

▶ Affichage des températures

L'affichage se fait sur 4 lignes de 12 caractères. Sur une position donnée (ligne et colonne), on peut afficher des données suivant différents formats (texte, donnée numérique, date, etc.). Il faut pour cela implémenter des fonctions DISPLAY sur la feuille (groupe FBD).

Implémentez quatre fonctions DISPLAY avec les paramètres suivants :

- L'affichage des légendes

  Ligne 2 colonne 1, Option utilisateur = Texte, Texte = « Ball. ».

  Ligne 3 colonne 1, Option utilisateur = Texte, Texte = « Capt. ».

- L'affichage des températures

  Pour le ballon, ligne 2, colonne 7, Mode d'affichage = 1/1. Reliez son entrée à la sortie de la cellule GAIN de la voie température du ballon (B03).

  Pour le capteur, ligne 3, colonne 7, Mode d'affichage = 1/1. Reliez son entrée à la sortie de la cellule GAIN de la voie température du capteur (B04).

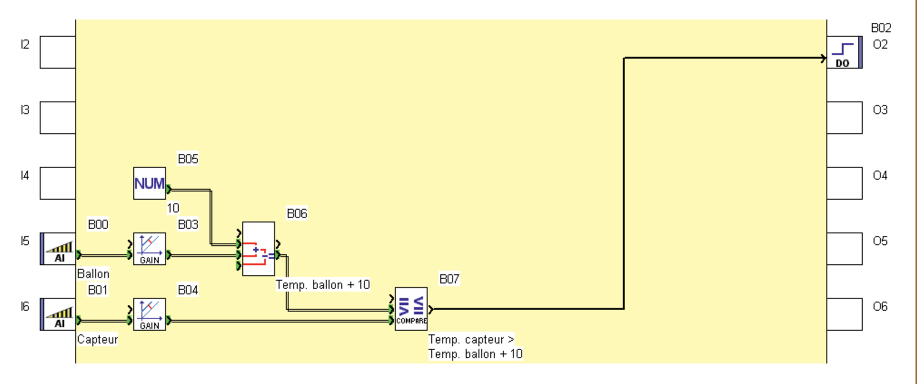


Figure 28
Affichage des fonctions programmées.

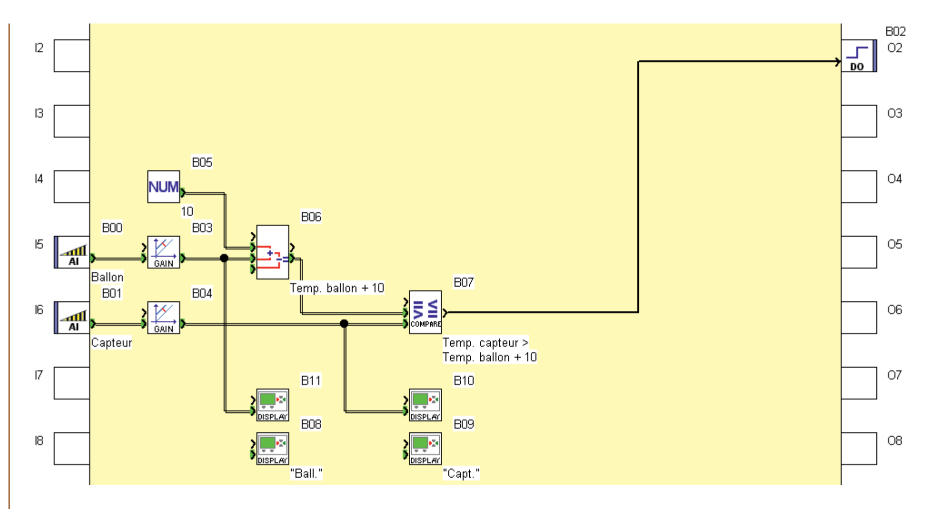


Figure 30
Feuille de travail finalisée.

Au final, après ajout de quelques commentaires, on obtient le schéma complet recherché (figure 30).

Simulation de l'application sur un PC

Comme nous l'avons vu, le mode Simulation permet de tester dynamiquement le comportement de l'application créée en mode Édition. Pour accéder à ce mode, cliquez dans la barre contrôleur sur le bouton S (figure 31).

Une boîte de dialogue apparaît, informant des ressources utilisées par l'application, ainsi que de ses performances (temps d'exécution). Validez en cliquant sur OK (figure 32).

Un affichage dynamique de toutes les valeurs d'entrée et de sortie des fonctions implémentées est alors proposé (figure 32).

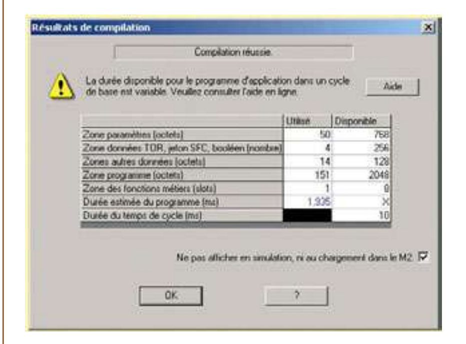
Les liaisons entre fonctions gérant des données numériques sont indiquées par des traits doubles. Les liaisons entre fonctions gérant des données binaires sont indiquées par des traits simples de couleur bleue lorsque le signal est OFF, de couleur rouge lorsqu'il est ON. Une fois la simulation initiée, vous pouvez modifier tous les paramètres des fonctions implémentées (double-cliquez sur la fonction), modifier les valeurs des entrées (simple clic sur l'entrée de la fonction implémentée), ou forcer une donnée de sortie.

Lorsque la simulation démarre, les entrées ont pour valeur 0, ce qui signifie que la température de la sonde du capteur est de – 10 °C et celle du ballon de 0 °C. La pompe est donc à l'arrêt.

Pour influer sur le comportement de l'application, modifiez la valeur des températures d'entrée (capteur et ballon). Par exemple, pour actionner la pompe avec une entrée de température du ballon à



Figure 31
Bouton d'accès au mode Simulation.


Résultats de compilation

Compilation réussie

La durée disponible pour le programme d'application dans un cycle de base est variable. Veuillez consulter l'aide en ligne.

Aide

	Utilisé	Disponible
Zone paramètres (octets)	50	768
Zone données TOR, jeton SFC, booléen (nombre)	4	256
Zones autres données (octets)	14	128
Zone programme (octets)	151	2048
Zone des fonctions métiers (slots)	1	0
Durée estimée du programme (ms)	1,935	X
Durée du temps de cycle (ms)		10

Ne pas afficher en simulation, ni au chargement dans le M2

OK ?

Figure 32
Fenêtre de compilation.

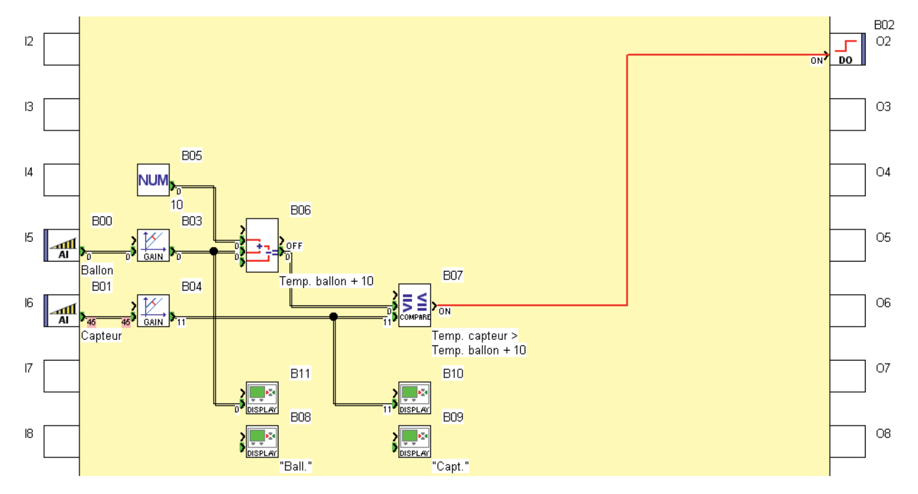


Figure 33
Feuille de travail en mode Simulation.

0 °C, cliquez sur le plot d'entrée capteur (B01) et entrez une valeur supérieure à 44 (> 10 °C).

Affichage des températures

Ouvrez la petite fenêtre Face avant, située en bas et à gauche de l'écran, ou utilisez le menu Fenêtre/Face avant (figure 34).



Figure 34
Affichage des températures du Millenium.

Câblage des périphériques

Le boîtier d'alimentation du Millenium alimente également les sondes de température (sondes 3 fils). Le circulateur est un modèle 220 V dont la commande est assurée par le relais intégré à la sortie O2 du Millenium.

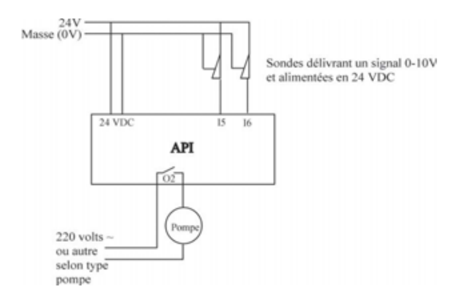


Figure 35
Câblage des périphériques.

Maison environnementale et économies d'énergie aux Éditions Eyrolles

P.-G. Bellin, *L'habitat bio-économique*, coll. Habiter autrement, 2008

P.-G. Bellin, *Se chauffer au bois*, coll. Petite encyclo de la maison, 2006

Y. Benoît, T. Paradis, *Constructions de maisons à ossature bois*, 2007

B. Béranger, *Les pompes à chaleur*, 2e édition, 2008

Collectif d'auteurs, *Guide de la bio-restauration*, coll. Habiter autrement, à paraître

École d'Avignon, *Techniques et pratique de la chaux*, 2003

B. Gonthiez, *Utiliser l'eau de pluie*, 2008

P. de Haut, *Construire une maison non toxique*, 2008

P. de Haut, *25 moyens d'économiser son argent et notre environnement*, 2007

P. de Haut, *Chauffage, isolation et ventilation écologiques*, 2007

B. Herzog, *Le puits canadien*, 2007

I. Jouhanneau, *Faire le bio-bilan de sa maison*, 2008.

M. Moro, *Bien choisir sa maison*, 2005

R. Newman, *La construction à ossature traditionnelle en chêne*, 2007

J. Repiquet, L. Duca, *Construire en bois aujourd'hui*, coll. Construire, rénover, habiter, 2007

E. Riolet, *L'énergie solaire et photovoltaïque pour le particulier*, 2008

E. Riolet, *Le mini-éolien*, 2007

C. Simonin-Adam, *Acoustique et réhabilitation. Améliorer le confort dans l'habitat existant*, 2002

I. ViaGardini, *Enduits et badigeons de chaux*, 2006

B. Vu, *Rénover sa maison après le Grenelle de l'environnement*, 2008

B. Vu, *5 diagnostics immobiliers obligatoires*, 2007

B. Vu, *Choisir une énergie renouvelable adaptée à sa maison*, 2007

B. Vu, *Choisir une énergie renouvelable adaptée à sa maison*, 2007

B. Vu, *Les isolants écologiques*, 2007

B. Vu, *Isoler écologique*, 2007

B. Vu, *La maison à énergie zéro*, 2007

B. Vu, *Construire ou rénover en respectant la haute qualité environnementale*, 2006

B. Vu, *L'habitat écologique et les aides de l'État*, 2006

B. Vu, *Récupérer les eaux de pluie*, 2006

B. Vu, *Gestion et récupération des eaux pluviales*, 2006

Dans la même collection

J.-P. Foray. – **Construire soi-même sa piscine**, G11998, 2006.
J. Zerlauth. – **L'autoconstruction en bois**, G11625, 2006.
Y. Benoit & T. Paradis. – **Construction de maisons à ossature bois**, en coédition avec le FCBA, G12047, 2007.
Syndicat national du béton cellulaire. – **Construire en thermopierre**, G11986, 2007.
L. Cagin & L. Nicolas. – **Construire en pierre sèche**, G12309 (à paraître).